# MÉTAUX ET ALLIAGES

OUVRAGES DE M. LE GÉNÉRAL GRARD

---

**L'Acier.** *Aviation. Automobilisme. Constructions mécaniques. Sanctions de la guerre.* 2e édition. 1921. Volume grand in-8, avec 113 figures et 21 planches,. . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . **30** fr.

**L'Aluminium et ses alliages.** *Étude rationnelle des caractéristiques et des traitements thermiques. Applications industrielles.* 1920. Volume grand in-8, avec 87 figures et 25 planches hors texte . . . . . . . . . . . **30** fr.

**Aciers à outils.** *Procédés de MM. Taylor et White.* 1908. In-8, avec 29 figures (*Épuisé.*)

**Cuivre et laitons à cartouches.** *Essais mécaniques et micrographiques.* Préface de M. G. Charpy. 1909. Vol. in-8, avec 15 figures et 22 planches in-4. . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . **9** fr.

**Recherches sur la dureté et la fragilité des Aciers.** 1911. Brochure in-8, avec 9 figures et 3 planches hors texte . . . . . . . **2** fr. **75**

(*Berger-Levrault, Éditeurs* )

GÉNÉRAL C. GRARD
INSPECTEUR GÉNÉRAL
DE L'AÉRONAUTIQUE

J. COURNOT
PROFESSEUR
A L'ÉCOLE SUPÉRIEURE D'AÉRONAUTIQUE

# MÉTAUX ET ALLIAGES

## TOME II

*Avec 124 figures dans le texte*
*et 22 planches dont 4 hors texte*

PARIS
ÉDITIONS BERGER-LEVRAULT
5, RUE AUGUSTE-COMTE (VI^e^)
1930

# AVANT-PROPOS

Le général Grard, inspecteur général de l'Aéronautique, et M. l'ingénieur Cournot ont assuré, depuis 1921, l'enseignement de la métallurgie à l'École supérieure d'Aéronautique.

Depuis cette époque, chaque année a apporté dans le domaine métallurgique son contingent de progrès et de réalisations nouvelles.

L'Aéronautique, notamment, a affirmé son orientation vers la construction métallique.

Ayant nettement précisé et fait connaître ses besoins, elle a été naturellement l'instigatrice de progrès métallurgiques considérables dont on la savait la première bénéficiaire.

C'est ainsi que le bon fonctionnement des moteurs d'aviation donnant à la notion de la *zone thermique de travail* une importance considérable, des études de laboratoire ont été entreprises et des aciers spéciaux ont été élaborés permettant de donner satisfaction à ces exigences.

La nitruration, durcissement superficiel des aciers, appliquée aux cylindres des moteurs, a eu pour résultat d'assurer la conservation de la puissance en augmentant l'endurance.

D'une façon générale, la recherche de la sécurité dans la légèreté, si capitale pour l'Aéronautique, a poussé les métallurgistes à élaborer des aciers dont les constituants appropriés permettent de concilier des exigences éminemment contradictoires.

Les alliages légers et ultra-légers ont donné lieu à de nom-

breuses études destinées à améliorer leurs caractéristiques et à préciser la technique de leur traitement et de leur emploi.

Pour tous les métaux et alliages, s'est posée la question capitale de leur conservation dans les différents milieux et aux diverses températures. C'est l'important problème de l'oxydabilité et de la corrosion dont la solution est recherchée, à l'heure actuelle, dans de nombreux laboratoires. Des réalisations industrielles intéressantes sont dès maintenant obtenues. Elles sont complétées par des procédés de protection qui sont un adjuvant précieux à la résistance constitutionnelle des alliages à cette dangereuse altération.

Dans d'autres domaines encore, le progrès est sensible et se poursuivra sans arrêt.

Mais, d'ores et déjà, il a paru nécessaire aux auteurs de faire le point et de publier dans un but didactique et documentaire le présent ouvrage.

Le premier volume est relatif à la Métallurgie générale et expérimentale.

Le deuxième volume concerne la Sidérurgie.

Le troisième volume traite de la métallurgie des métaux et alliages non ferreux.

Au cours de l'exposé, et au fur et à mesure des besoins, chaque auteur a invoqué les études auxquelles il s'était spécialement livré.

C'est ainsi que l'inspecteur général Grard a fait un large appel à ses travaux antérieurs :

*Cuivre et Laitons à cartouches* (1),
*L'acier* (2),
*L'aluminium et ses alliages* (3),

à ses recherches sur les aciers spéciaux, métaux et alliages légers, en renvoyant pour plus ample documentation les lecteurs à ces ouvrages eux-mêmes.

---

(1) Berger-Levrault, éditeurs.
(2) Berger-Levrault, 1919, éditeurs.
(3) Berger-Levrault, 1920, éditeurs.

L'ingénieur Cournot a rappelé ses expériences sur le revêtement des métaux et alliages (1), sur la viscosité des métaux (2), expériences tout à fait à l'ordre du jour et susceptibles d'applications pratiques immédiates.

Certaines parties ont donné lieu à un développement plus considérable que certaines autres. Cette disproportion a été volontaire.

Les auteurs ont, en effet, voulu s'étendre d'une façon particulièrement détaillée sur les procédés nouveaux ou sur l'évolution des produits métallurgiques qui jouent actuellement un rôle primordial dans la construction aéronautique, dont les exigences sont les plus impératives.

« Faire le point », avons-nous dit, a été le but de cet ouvrage qui résume l'état de la Métallurgie en 1930.

Des compléments pourront être apportés dès que la nécessité s'en fera sentir, de façon à doter aussi longtemps que possible cet ouvrage d'une qualité indispensable en pareille matière : « l'actualité ».

*Les Éditeurs.*

(1) *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. 182, p. 696; t. 183, p. 789; t. 183, p. 1289; t. 184, p. 1172; t. 184, p. 1250; t. 185, p. 1041; t. 185, p. 773; t. 187, p. 298.

(2) *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. 181, p. 661; t. 183, p. 885; t. 185, p. 650.

L'ingénieur Cournot a rappelé ses expériences sur le revêtement des métaux et alliages (1), sur la viscosité des métaux (2), expériences tout à fait à l'ordre du jour et susceptibles d'applications pratiques immédiates.

Certaines parties ont donné lieu à un développement plus considérable que certaines autres. Cette disproportion a été volontaire.

Les auteurs ont, en effet, voulu s'étendre d'une façon particulièrement détaillée sur les procédés nouveaux ou sur l'évolution des produits métallurgiques qui jouent actuellement un rôle primordial dans la construction aéronautique, dont les exigences sont les plus impératives.

« Faire le point », avons-nous dit, a été le but de cet ouvrage qui résume l'état de la Métallurgie en 1930.

Des compléments pourront être apportés dès que la nécessité s'en fera sentir, de façon à doter aussi longtemps que possible cet ouvrage d'une qualité indispensable en pareille matière : « l'actualité ».

*Les Éditeurs.*

---

(1) *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. 182, p. 696; t. 183, p. 789; t. 183, p. 1289; t. 184, p. 1172; t. 184, p. 1250; t. 185, p. 1041; t. 185, p. 773; t. 187, p. 298.

(2) *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. 181, p. 661; t. 183, p. 885; t. 185, p. 650.

# PRODUITS SIDÉRURGIQUES

## TITRE I

## CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES SUR LES TRAITEMENTS DES MINERAIS

### CHAPITRE I

### LES TRAITEMENTS DES MINERAIS

Il y a deux catégories de traitements :

*a*) Les traitements par voie sèche.

*b*) Les traitements par voie humide.

On peut avoir recours au courant électrique :

Électrométallurgie ;

| | |
|---|---|
| Électrolyse. . | Voie sèche. — Aluminium, etc... |
| | Voie humide. — Cuivre, plomb, zinc, etc... |

a) *Voie sèche.* — L'opération a lieu à température élevée.

| | |
|---|---|
| Calcination (ou grillage). . . | Simple. |
| | Oxydante. |
| | Réductrice. |
| | Carburante (cémentation), etc... |

| | |
|---|---|
| Fusion. . . . | Simple.<br>Oxydante.<br>Réductrice, etc... |
| Volatilisation. | |
| Électrolyse à température élevée. | Par exemple : Bain d'alumine en solution dans la cryolithe fondue (900° à 950°) pour produire l'aluminium. |

b) *Voie humide.* — Le métal est amené en solution à la température ordinaire, puis séparé par divers procédés qui sont les suivants :

Dissolution et Précipitation (cas particulier de la fabrication du cuivre).

Amalgamation.

| | |
|---|---|
| Électrolyse. . | Anodes solubles.<br>Anodes insolubles. |

On peut d'ailleurs avoir recours successivement à un procédé de voie sèche et de voie humide.

## Minerais.

Les principaux minerais industriels sont :

Les métaux natifs (or, cuivre).

Les oxydes et carbonates (étain, cuivre, manganèse, silicium, vanadium, chrome, tungstène, etc...).

Les sulfures (cuivre, zinc, plomb).

Les silicates, chlorures et sulfates.

A. Préparation des minerais. —Avant leurs traitements, les minerais sont l'objet d'un certain nombre d'opérations préparatoires.

Ces opérations sont :

Le *triage* au moyen de classeurs, de trémies.

On peut utiliser la *gravité* de certains minerais pour les séparer de leurs gangues.

On peut profiter de la *solubilité* des métaux dans certains liquides.

On peut avoir recours à des *procédés électrostatiques* permettant de séparer les minerais magnétiques des autres.

Une méthode très pratique de séparation et de concentration employée surtout aux États-Unis, au Canada, en Australie, est celle du *flottage* ou de la flottation, permettant de rassembler

diverses espèces minérales en dépit de leur enchevêtrement et de leur division dans les minerais complexes.

Elle a été remarquablement exposée dans une étude de M. Charles Berthelot à laquelle pour plus de détails nous renvoyons nos lecteurs (1).

*Méthode du flottage.* -- Elle est résumée ci-après :

Certains minerais, dit M. Ch. Berthelot, ont été négligés en raison de leur composition complexe, leur pauvreté en métal à extraire, leur ténuité rendant difficile la concentration, comme c'est le cas de produits très fins, dits *schlamms*.

La technique du flottage est venue remédier à cette situation en permettant de traiter tous les bas-produits.

Le flottage se substitue peu à peu au lavage.

« Par le flottage, on peut extraire jusqu'à 96 % de cuivre de minerais à teneur de moins de 1 % en rejetant les stériles de 0,1 % (2). »

Par l'emploi du flottage, la Compagnie d'Anaconda a pu réaliser un supplément annuel de fabrication égal à 48.000 t.

Des mines qui ne retiraient de minerais à 16 kg de cuivre que 10 kg 5 arrivent par le flottage à en retirer désormais 14 kg.

Pour le zinc et le plomb, les mêmes avantages économiques ont été réalisés par le flottage.

*Technique du flottage.* — Dans le flottage, une particule de minerai, en présence de l'eau, est soumise à deux actions antagonistes.

1° Son poids proportionnel au cube du diamètre qui tend à l'immerger.

2° La tension superficielle de l'eau se traduisant pour les particules *non mouillées*, par une résistance à se laisser pénétrer proportionnellement au carré du diamètre.

L'effet dû à la pesanteur s'atténue beaucoup plus vite que celui résultant de la tension superficielle.

Il y a donc un degré de finesse pour lequel l'immersion est empêchée.

(1) *Revue de Métallurgie*, juillet, août, septembre 1928. *La séparation et la concentration des minerais de flottage*, par Ch. BERTHELOT.

( ) *Revue Universelle des Mines*, 1er mai 1926. Rapport de MM. Sommaire et Mensier au Congrès du Génie civil.

a) *Minerais sulfurés.* — L'application de ce principe est la suivante.

Pour séparer les gangues des particules de minerais sulfurés, on enrobe d'huile ces composés métalliques.

Les gangues ne subissent pas l'action de l'huile et sont ainsi *mouillables*, alors que les particules de minerais sulfurés subissent cette action et deviennent *non mouillables*.

Ces particules si elles sont bien pulvérisées flottent alors que les gangues tombent au fond.

De l'air injecté ajoute son action à celle de l'huile pour faciliter l'ascension dans le liquide sous forme de mousse.

On a finalement :

Au fond, les gangues.

A la surface, une mousse comprenant du sulfure, de l'eau et de l'huile.

Cette écume retient les sels métalliques.

L'huile recherchée comme agent de flottage est l'huile de pin.

*Agents modifiants.* — Quand on veut réaliser un flottage sélectif ou différentiel, ou neutraliser l'effet de certains éléments nuisibles dans le minerai qui empêchent le flottage, on a recours à des agents modifiants. Ils peuvent accélérer le flottage de certains éléments et retarder le flottage des autres.

Dans le cas d'un complexe de galène et de blende (minerai du plomb et du zinc), on peut accélérer le flottage du minerai de plomb et retarder celui du zinc, ce qui permet la séparation.

Parmi les agents modifiants exerçant leur action sélective, on peut citer les acides (notamment l'acide sulfurique), le sulfate de cuivre, le sulfate de chaux, l'hydrogène sulfuré, le sulfure de sodium, le chlore qui retarde le flottage du sulfure de zinc, et permet ainsi la séparation du plomb et du zinc.

On peut aussi utiliser des alcalis, etc...

Il y a toujours une étude préalable à faire pour voir les aptitudes au flottage du minerai et les agents réactifs et sélectifs de flottage susceptibles d'être employés.

b) *Minerais oxydés.* — Les minerais oxydés voient diminuer le pouvoir adhésif pour l'huile collectrice. Ils ressemblent à des gangues et il faut avoir recours à des procédés spéciaux pour obtenir le flottage.

On n'en est guère qu'à la phase expérimentale pour ces minerais. On les enrobe d'un film de sulfure généralement le sulfure de sodium, sulfure soluble incorporé après le broyage.

Pour la cérusite $Co^3Pb$, on a :

$$CO^3Pb + Na^2S = PbS + CO^3Na^2$$

Pratiquement, quand un minerai est constitué par un mélange de sulfures et d'oxydes, il convient de récupérer les sulfures d'abord. On sépare ensuite les oxydes en les soumettant à la sulfuration, si possible.

Le matériel nécessaire pour la pratique du flottage comprend :
des concasseurs et broyeurs,
des classificateurs,
des machines de flottage.
des filtres sécheurs
et des tables de lavage.

B. Traitements généraux des minerais. — *Métaux natifs.* — Il s'agit de les séparer d'une gangue plus ou moins abondante, ce qui se fait soit par scorification, soit par solution du métal suivie de précipitation.

*Oxydes et carbonates.* — Les carbonates métalliques (sauf les alcalins), étant décomposés par la chaleur en acide carbonique et oxydes métalliques, sont traités comme les oxydes. Ceux-ci sont soumis :
à une calcination réductrice, suivie de fusion (cuivre),
à une fusion réductrice (plomb, étain), ou
à une distillation réductrice (zinc).

Pour l'aluminium, on emploie l'électrolyse de l'alumine.

Pour le nickel, on se sert de l'hydrogène comme réducteur.

On peut également avoir recours à l'*aluminothermie* pour la réduction des oxydes. Le principe est le suivant :

L'aluminium réduit les oxydes des métaux ou métalloïdes ayant une chaleur de combustion inférieure à la sienne propre (thermochimie).

Un amorçage facile est nécessaire. Goldschmitt a imaginé une

cartouche d'allumage, boule constituée par du bioxyde de baryum et de la poudre d'aluminium agglutinés.

L'amorce est mise à la surface du mélange. On enfonce un fil de magnésium. On met le feu au fil et la réaction.

$$4\ Al + 3\ Ba\ O^2 = 2\ Al^2\ O^3 + 3\ Ba$$

se propage.

*Sulfures.* — *Grillage oxydant simple* (mercure).

$$M.\ S. + O^2 = M + SO^2$$

*Grillage oxydant avec réaction* (cuivre).

Un grillage partiel à température relativement basse donne :

$$3\ M.\ S. + 6\ O = 2\ MO + MS + 2\ SO^2$$

Puis, à température plus élevée, on a réaction de l'oxyde sur le sulfure résiduel selon la formule :

$$2\ MO + MS = 3\ M + SO^2$$

C'est la métallurgie actuelle du cuivre.

*Grillage à mort avec réduction* (plomb, antimoine, zinc). Ceci suppose la transformation complète du sulfure en oxyde

$$MS + 3\ O = MO + SO^2$$

suivie de réduction

$$MO + C = M + CO$$
$$MO + CO = M + CO^2$$

*Grillage à mort suivi de dissolution des impuretés* (argent).

*Silicates.* — Réduction directe du silicate par le carbone.

Addition au minerai de matières sulfurantes pour transformer le

silicate en sulfure et des bases nécessaires pour la scorification de la silice (nickel).

*Affinage de métaux.* — Il est souvent nécessaire de procéder à l'affinage des métaux par l'un des procédés suivants :

1° Oxydation des impuretés (plomb argentifère).

2° Liquation, c'est-à-dire fusion et séparation par ordre de densité.

3° Formation d'alliages d'où l'on sépare le métal cherché.

4° Électrolyse (raffinage électrolytique du cuivre, de l'argent, de l'or, du zinc, du plomb et de l'étain).

## TITRE II

# DÉFINITIONS STANDARDS

---

## CHAPITRE II

## DÉFINITIONS STANDARDS DES PRODUITS SIDÉRURGIQUES

---

Trois grands groupes : Fers, Aciers, Fontes se distinguent particulièrement par leur teneur variable en carbone ou leur mode différent d'élaboration.

A. FER. — Produit sidérurgique obtenu sans passer par l'état liquide et ne durcissant pas par la trempe (Définition Standard $A_1$ 2 de la Commission permanente de l'Unification, 4 juin 1920).

Teneur en cardonne de $\frac{1}{1.000}$ à $\frac{5}{1.000}$ (à partir de $\frac{5}{1.000}$, la trempe fait son apparition).

B. ACIER. — Produit sidérurgique obtenu en passant par l'état liquide et malléable (Définition Standard, Fascicule $A_1$ 2 de la Commission permanente d'Unification, 4 juin 1920).

Teneur en carbone industriellement comprise entre $\frac{5}{1.000}$ et 1,5.

De 1,5 à 2,5 % de carbone, on a « les aciers *sauvages* » pratiquement très peu utilisables.

C. Fonte. — Produit sidérurgique obtenu en passant par l'état liquide et non malléable (Définition Standard, Fascicule $A_1$ 2, de la Commission permanente d'Unification, 4 juin 1920).

Teneur en carbone industriellement comprise entre $\frac{25}{1.000}$ et $\frac{55}{1.000}$

La teneur 6,7 % de carbone en poids correspond à la formule $Fe^3$ C (cémentite).

La *fonte* est en général le produit intermédiaire entre le minerai et les aciers et les fers. C'est donc son élaboration que nous exposerons en premier lieu.

Nous continuerons par l'élaboration du fer puis par l'élaboration de l'acier.

# TITRE III

## CHAPITRE III

## FONTES

I. Propriétés générales. — La fonte est un produit métallurgique excessivement complexe.

La température de fusibilité varie, suivant la composition, entre 1.050° et 1.130°.

Les fontes ordinaires non traitées ne sont pas malléables.

La résistance à la traction est en moyenne de 12 kg.

La résistance à la compression est d'environ 70 kg.

La fragilité des fontes ordinaires est grande et croît avec la teneur en phosphore.

La dureté des fontes est augmentée par le manganèse. Elle est diminuée, au contraire, par le silicium et le graphite.

Le phosphore a un rôle utile, du moins jusqu'à un certain pourcentage, dans les fontes. Il les rend fluides. Il permet une grande fragmentation des obus.

Le soufre est toujours nuisible et à éviter le plus possible.

II. Production mondiale. — La production mondiale de fonte est de l'ordre de 85 millions de tonnes réparties environ comme suit (statistiques 1928) :

| | | |
|---|---|---|
| États-Unis. . . . . . . . . . . . . | 38,0 | millions. |
| France. . . . . . . . . . . . . . | 10,0 | millions. |
| Sarre . . . . . . . . . . . . . . | 1,9 | millions. |
| Luxembourg . . . . . . . . . . . | 2,8 | millions. |

| | |
|---|---|
| Allemagne . . . . . . . . . . . . . | 11,7. millions |
| Angleterre . . . . . . . . . . . . . | 6,7 millions. |
| Belgique. . . . . . . . . . . . . . | 3,9 millions. |
| Tchécoslovaquie . . . . . . . . . . | 1,3 millions. |
| Russie. . . . . . . . . . . . . . . | 2,5 millions. |
| Japon. . . . . . . . . . . . . . . | 1,2 millions. |

A noter, que par tonne de fonte, il faut 1 t 2 à 1t 4 de coke métallurgique.

III. Élaboration de la fonte. — Nous allons exposer successivement :

1° Le choix des agents métallurgiques;

2° L'utilisation de ces agents pour la production de la fonte.

1° *Agents métallurgiques :*

*a*) Minerais,

*b*) Combustibles.

*c*) Fondants,

*d*) Matériaux de revêtement.

a) *Minerais. Minerais de fer.* — Les minerais de fer sont abondants dans la nature.

Pour qu'un minerai soit pratiquement utilisable, sa teneur en fer doit être d'au moins 28 %.

Il doit être exempt d'impuretés nuisibles, comme l'arsenic.

Les substances qui accompagnent le minerai de fer sont la silice, la chaux, l'alumine, la magnésie, l'oxyde de manganèse, l'acide carbonique, l'eau, l'acide phosphorique et le soufre.

Le minerai est dit *acide* si la silice est en excès.

Le minerai est dit *basique*, s'il y a majorité d'oxydes basiques.

Les minerais de fer les plus importants sont les suivants :

*L'oxyde magnétique de fer* $Fe^3O^4$ (Fe = 72,4 %).

C'est le minerai le plus pur et le plus riche. On le trouve en Suède, en Norvège, aux États-Unis, au Canada et dans l'Oural.

Il a une teneur courante de 45 à 70 % de fer. Il peut contenir de 0,02 à 3 % de phosphore. La présence de cette impureté exige parfois un grillage préalable.

*L'oxyde ferrique anhydre* $Fe^2 O^3$ (Fe = 70 %) comprenant :

*le fer oligiste :* manganésifère, non phosphoreux (Ile d'Elbe États-Unis, Russie).

*l'hématite rouge fibreuse* peu phosphoreuse, et riche en fer. La teneur courante est de 40 à 65 %.

*l'hématite rouge ordinaire* phosphoreuse, qu'on rencontre en France dans l'Ardèche, puis aux États-Unis et au Canada.

*l'oxyde ferrique hydraté* ($Fe^2 O^3$, $n\ H^2O$), comprenant :

*les hématites brunes* (*phosphoreuses*) très répandues, et

*les hématites jaunes* (phosphoreuses) très abondantes en Lorraine (Longwy, Bassin de Briey). Ce sont les *minettes*.

Leur teneur en fer varie de 28 à 45 %.

Puis, *les carbonates de fer* ($Fe\ CO^3$) (Fe = 48.4 %).

La teneur normale en fer à l'état non grillé est de 25 à 40 %. A l'air, ils se transforment rapidement en oxyde de fer avec dégagement d'acide carbonique. Le minerai qui était blanc-jaunâtre devient brun-noir.

Ce minerai qui est peu phosphoreux est riche en chaux et manganèse. Il contient du cuivre. Certains de ces minerais contiennent de l'argile. On en trouve dans les mines de charbon anglaises.

Citons encore les *sulfures de fer*.

Seuls les oxydes de fer sont utilisables dans le haut fourneau.

Les carbonates et sulfures doivent, avant utilisation, être transformés par grillage, en oxydes.

Outre ces minerais, on peut utiliser certains sous-produits, — comme les scories des fours à réchauffer souvent très riches en fer. — L'industrie chimique fournit souvent des sous-produits, comme les résidus des pyrites grillées, contenant de 58 à 65 % de fer, très peu de phosphore (P 0,02 %) mais une quantité assez importante de soufre pouvant s'élever jusqu'à 6 %.

*Minerais de manganèse.* — Il faut noter que les minerais de fer ne contiennent pas, en général, assez de manganèse pour permettre d'obtenir une teneur convenable en manganèse dans le produit fini.

De ce fait, on est obligé d'ajouter des minerais de manganèse dont les plus généralement employés sont :

les spaths de manganèse ($Mn\ CO^3$), minerai assez rare qu'on doit soumettre à un grillage préalable.

les oxydes hydratés de manganèse ($Mn^2O^3,H^2O$) également rares,

et les pyrolusites ($Mn\ O^2$).

Ces minerais de manganèse proviennent de Russie, du Brésil ou des Indes.

*Préparation du minerai.* — Une certaine préparation est souvent nécessaire. On peut rechercher une certaine grosseur de grains. Les grains trop petits peuvent obstruer le four et rendent le passage des gaz difficile.

La grosseur des morceaux est fonction de la hauteur du four. Une certaine sélection s'impose.

On chauffe au préalable certains minerais très denses de façon à amener une fissuration permettant au gaz de pénétrer à l'intérieur de la masse.

Un grillage permet d'éliminer les constituants volatils. C'est le cas du carbonate de fer et des minerais sulfureux. Avec ces derniers, il se forme un sulfate qui est éliminé par lavage à la lessive.

Quelquefois, un minerai de fer magnétique est mélangé d'impuretés non magnétiques. On peut avant concassage procéder à une séparation magnétique.

On peut utiliser les minerais pulvérulents et les poussières du gueulard du haut fourneau en formant des briquettes ou agglomérés avec des liants ou par pression, agglomérés que l'on peut morceler.

b) *Combustibles.* — *Charbon de bois.* — Peu employé. Très onéreux, mais donne des fontes de premier choix.

*Houille.* — Très peu employé, ne convient pas. Trop friable. Contient beaucoup de soufre nuisible.

*Coke métallurgique.* — C'est le vrai combustible, employé pour le traitement des minerais au haut fourneau.

Le coke métallurgique est très différent du coke de gaz. Il doit être très dense et résister à l'écrasement. Il provient de houilles sèches à longues flammes, préalablement broyées afin de donner un coke compact et résistant.

Il est fabriqué dans les fours à coke.

Ces fours sont quelquefois placés dans le voisinage des hauts fourneaux. Indépendamment du coke métallurgique, ils fournissent des gaz combustibles et fonctionnent ainsi à la façon de gazogènes.

*Gaz combustibles.* — Les combustibles gazeux industriels sont, par ordre de pouvoir calorifique décroissant : le gaz naturel (pratiquement inconnu en Europe), le gaz de four à coke, le gaz de gazogène, le gaz de haut fourneau.

Le gaz le plus utilisé en sidérurgie est celui élaboré dans les *gazogènes*; ces appareils sont, soit du type Siemens, soit mieux du

type à cuve soufflée doublés de récupérateurs et générateurs; ces derniers fournissent un combustible jouant un rôle très important dans la production des produits sidérurgiques.

c) *Fondants et Laitiers.* — Le minerai de fer est mélangé à la gangue constituée par la silice, l'argile et le carbonate de chaux. Il est donc siliceux, argileux ou calcaire (gangue simple) ou les deux ou les trois à la fois (gangue complexe).

Pour fondre la gangue, il faut des fondants évitant la *perte du métal.*

*Gangue argileuse.* — Il faut former un silicate double fusible. Si l'on n'ajoute rien, la gangue avec le minerai formera un silicate double d'alumine et de fer d'où perte de métal.

Si on ajoute du carbonate de chaux « castine », on forme un silicate double d'alumine et de chaux.

*Gangue calcaire.* — On ajoute de l'argile « erbue » pour faire le silicate double.

*Gangue purement siliceuse.* — Très rare. Il faut, dans ce cas, ajouter deux bases.

Ces silicates fusibles renfermant très peu d'oxydes métalliques constituent les *laitiers.*

Le laitier est donc constitué par la gangue terreuse du minerai, les cendres du coke introduit, les fondants. Naturellement, il se produit de nombreuses réactions entre ces laitiers, la fonte et les matériaux réfractaires qui garnissent les parois du four.

d) *Matériaux de revêtement.* — En dehors de l'ossature et de l'armature métallique des fours et hauts fourneaux, on emploie pour la construction de ces derniers des revêtements réfractaires.

Les briques réfractaires employées sont ou argileuses ou siliceuses. Leur résistance aux hautes températures dépend de leur teneur en alumine et de leur teneur en silice.

La teneur en alumine des briques argileuses varie de 26 à 45 %.

Les briques siliceuses sont dites *acides* et contiennent jusqu'à 99 % de silice.

Les briques basiques sont principalement celles qui renferment de la chaux et de la magnésie ou un mélange de ces deux bases.

Nous verrons que les réactions acides ou basiques des fours et des soles exigent un choix dans les revêtements.

On emploie également pour la construction des hauts fourneaux des briques au carbone formées de coke pulvérisé avec addition de 20 % de goudron. Elles sont cuites en vase clos. On les utilise dans les parties du four où elles se trouvent complètement séparées de l'air par des masses métalliques en fusion, ce qui les empêche de brûler.

*Utilisation de ces agents pour la production de la fonte :*

Nous présentons schématiquement ci-après :
la constitution du haut fourneau,
la marche de l'opération,
et la classification des fontes, en terminant par quelques considérations sur les fontes spéciales.

### PARTIES ESSENTIELLES DU HAUT FOURNEAU (fig. 1)

1° *Ouvrage* (A, B, C, D). — Est à la partie inférieure du haut fourneau. Autour de l'ouvrage débouchent les tuyères, conduisant l'air, sous pression, réchauffé au préalable dans des appareils spéciaux.

2° *Creuset* (C, D, E, F). — Partie située au-dessous des tuyères. C'est là que se rassemblent les matières fondues.

C'est de là que sortent, d'une part, les scories, d'autre part, la fonte.

3° *Étalages* (A, B. G, H). — Tronc de cône renversé. La base supérieure est la partie la plus large du haut fourneau et constitue le ventre. La base inférieure est le sommet de l'ouvrage.

4° *Cuve* (G, H, I, J). — Tronc de cône qui va du ventre au gueulard, le gueulard comprend l'appareil de chargement *Cup* (K) qui est fixe et repose sans être scellé sur la partie supérieure de la maçonnerie et *cône* (L) qui peut s'élever ou s'abaisser.

### MARCHE DE L'OPÉRATION

*Réduction des oxydes.* — Il y a deux courants dans les hauts fourneaux :

Un courant solide de matériaux dirigé de haut en bas (minerai, combustible, fondant);

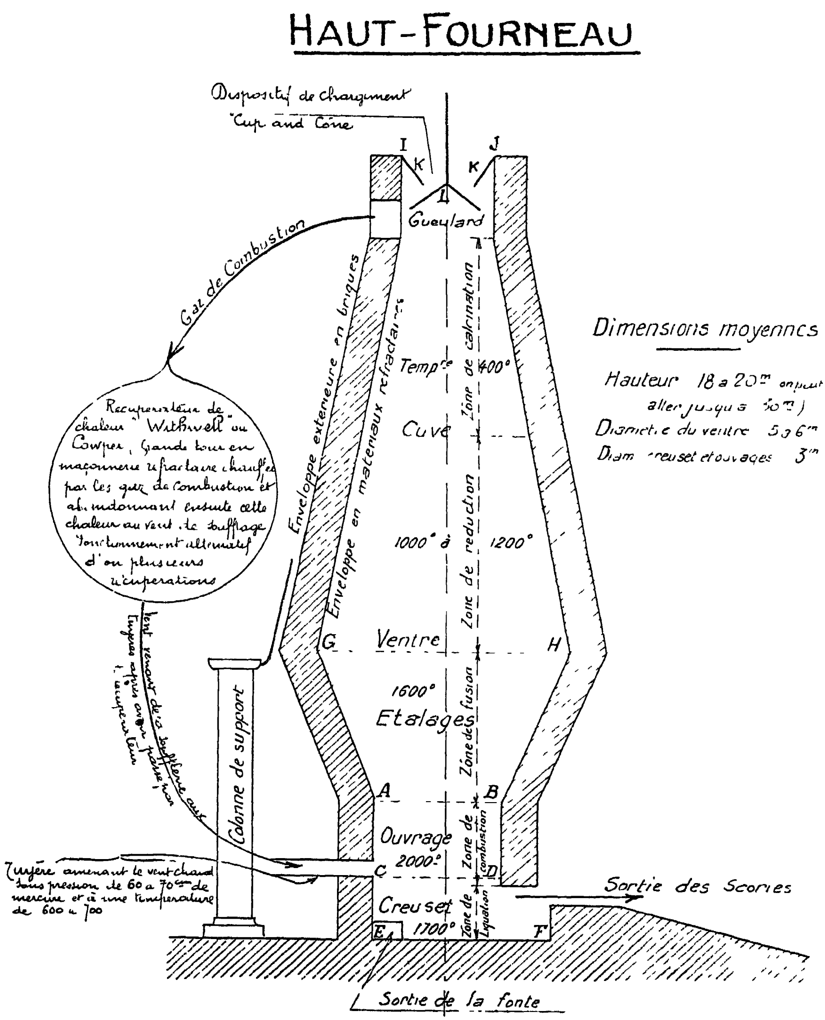



Fig. 1.

Un courant gazeux partant des tuyères et allant de bas en haut (CO, $CO^2$, Az).

Les agents réducteurs sont principalement :

C et CO

Les réactions réductrices de C et CO avec l'hématite, sont les suivantes :

(1) $2\ Fe^2O^3 + 6\ C = 6\ CO + 4\ Fe$
(2) $2\ Fe^2O^3 + 3\ C = 3\ CO^2 + 4\ Fe$
(3) $2\ Fe^2O^3 + 6\ CO = 6\ CO^2 + 4\ Fe$

formules qui sont loin de représenter toutes les réactions du haut fourneau.

La réaction (3) est la plus avantageuse parce qu'elle se produit avec une très faible absorption de chaleur : 295 calories par chaque kilo d'oxygène enlevé.

Elle constitue la marche idéale du haut fourneau.

La réaction s'effectue à la température la plus basse. C'est donc dans la région où la température du haut fourneau sera relativement faible que la marche sera la meilleure. On évite ainsi que $CO^2$ reforme constamment CO aux dépens du charbon solide, transformation qui se fait avec une forte absorption de chaleur.

A noter que cette réaction (3) est limitée par la réaction inverse :

$$2\ Fe + 3\ O = Fe^2O^3.$$

*Courant gazeux.* — O + Az, venant de la tuyère, devient $CO^2$ + Az, puis CO + O + Az au contact du coke incandescent, puis CO + Az, car O se combine au charbon pour former CO.

L'expérience montre que la réduction n'est complète, au niveau des tuyères, que si le rapport

$$\frac{CO^2}{CO}$$

ne dépasse pas en poids 0,7 ou 0,8.

Ce rapport est appelé l'indice de marche du haut fourneau.

Au gueulard, on a partiellement la réaction :

$$2\ CO = C + CO^2$$

qui dégage 3.134 calories par kilo de carbone déposé, chaleur absorbée par la charge, la vaporisation de l'humidité de cette charge et même la décomposition des carbonates. Cette réaction a lieu au-dessous de 400°, température du gueulard.

*Courant solide.* — *Zone de calcination* (haut de la cuve); il y a du carbone déposé par la réaction indiquée ci-dessus (température 400°).

*Zone de réduction* (bas de la cuve et ventre) (température 1.000° à 1.200°).

C'est là qu'on a :

$$2\ Fe^2\ O^3 + 6\ CO = 4\ Fe + 6\ CO^2$$

le carbone d'imprégnation ci-dessus visé, donnant de son côté :

$$2\ Fe^2\ O^3 + 3\ C = 4\ Fe + 3\ CO^2$$

*Zone de fusion* (étalages) (température 1.600°). — Le fer est en présence du coke incandescent. Il achève de se réduire et s'unit à du carbone, il se cémente. Ce métal, mélangé à Si et Mn est la fonte.

*Zone de combustion* (ouvrage) 1.800° à 2.000° température maximum. — C'est dans cette zone que les matières fondues arrivent devant les tuyères et il se produit une décarburation.

*Zone de liquation* (creuset) (température 1.700°). — C'est dans cette zone que les laitiers se placent au-dessus du métal fondu, il n'y a pour ainsi dire plus de réactions.

C'est dans le creuset que la fonte et le laitier se séparent par ordre de densité.

On procède à la coulée.

*Coulée* (1re fusion). — La coulée a lieu dans des poches qui conduisent la fonte au Bessemer ou dans des rigoles creusées dans le sable où l'on forme les « gueuses (1re fusion).

*Chargement du haut fourneau.* — Le haut fourneau nouvellement construit, doit tout d'abord être séché, après quoi on met fagots et rondins remplissant le bas du four, l'ouvrage et le creuset.

On recouvre de coke jusqu'au ventre.

On continue le chargement par couches alternées de coke, de minerai, de fondants et additions nécessaires. Puis on allume et on donne le vent sous pression progressive.

*Lit de fusion.* — Il y a toujours lieu de déterminer la compositions du *lit de fusion*, c'est-à-dire la proportion de coke, de fondants, de minerai et d'additions. Cette proportion dépend du résultat à obtenir.

Si l'on est obligé d'ajouter du manganèse, il faut tenir compte qu'un tiers du manganèse sera perdu par scorification.

*Allures du haut fourneau.* — L'allure du haut fourneau peut être chaude ou froide.

Pour passer à une allure plus chaude, on diminue le poids du minerai chargé, on augmente le poids du combustible, c'est-à-dire la mise au mille du coke, la pression et la température du vent soufflé.

*Allure froide.* — C'est l'allure économique. Elle donne des *fontes blanches*, sulfureuses et peu siliceuses (1 % de silicium). On ne peut pas les travailler. Elles sont destinées à l'affinage.

*Allure chaude.* — L'allure chaude augmente la proportion de silicium dans la fonte.

La présence du silicium donne de la fluidité et facilite le moulage.

Le silicium facilitant la précipitation du carbone à l'état de graphite permet d'obtenir des *fontes grises ou graphiteuses* qui se travaillent assez facilement.

La nécessité d'une allure chaude pour obtenir du silicium dans la fonte résulte du fait suivant : La silice qui existe dans le haut fourneau sous forme de silicate ou par suite d'addition volontaire dans le lit de fusion sous forme de silice, n'est réduite qu'aux températures élevées (1.600°).

Le silicium ainsi obtenu, en allure chaude, passe en partie dans la fonte, sous forme de siliciure de fer. On obtient ainsi des fontes grises de 3 à 3,5 de silicium, possédant les propriétés ci-dessus énoncées.

L'allure chaude produit également des fontes désulfurées. Le soufre provenant du coke et des gangues doit être absorbé par le laitier, car ce corps est très nuisible dans la fonte. Pour absorber ce soufre, le laitier doit contenir une forte proportion de chaux.

Cette forte proportion le rend peu fusible et une allure chaude est nécessaire pour réaliser cette fusion. Le soufre est absorbé sous forme de CaS qui reste dans le laitier.

*Extinction du haut fourneau.* — *a*) Arrêt momentané : On arrête la soufflerie.

On bouche les trous de coulée et les tuyères et on charge le gueulard de minerais très fins pour supprimer le tirage.

*b*) Arrêt définitif : Terminer la fusion sans charger, remplacer le minerai par la castine qui produit un excès de $CO^2$ rendant le gaz incombustible.

Puis on ouvre en grand le trou de coulée pour la coulée finale.

La fonte provenant du haut fourneau va servir directement au chargement des convertisseurs, ou sera utilisée pour une deuxième fusion.

*Mélangeurs.* — La fonte qui va alimenter les fours destinés à la fabrication de l'acier est souvent mise, au préalable, dans un mélangeur d'une contenance de 700 à 800 t. Ce mélangeur qui reçoit souvent la fonte de plusieurs hauts fourneaux, permet d'assurer une composition moyenne de la fonte.

Il s'y produit, également, une certaine désulfuration de la fonte dûe à l'action du manganèse qu'elle renferme. Il se produit un sulfure de manganèse facile à décanter. C'est un résultat intéressant étant donné la nocivité du soufre dans les produits sidérurgiques.

*Fontes de deuxième fusion.* — Les gueuses de fonte provenant du haut fourneau sont améliorées par une deuxième fusion.

Cette deuxième fusion opère une meilleure répartition des constituants, modifie la composition des constituants en diminuant les teneurs en graphite, manganèse et silicium.

Cette diminution limite le nombre des fusions successives qu'on pourrait faire. La fonte blanchit et la texture s'affine.

Cette deuxième fusion s'opère au cubilot, au four à réverbère ou au creuset.

Le cubilot est l'appareil le plus employé (fig. 2).

C'est un four de forme cylindrique dont les dimensions moyennes sont les suivantes :

| | |
|---|---|
| Diamètre intérieur . . . . . . . . . . . . | $0^m$ 60 |
| Hauteur. . . . . . . . . . . . . . . . . | 4 m |

Sa partie supérieure est prolongée par une cheminée C.
Le gueulard G s'ouvre sur la plate-forme de chargement P.

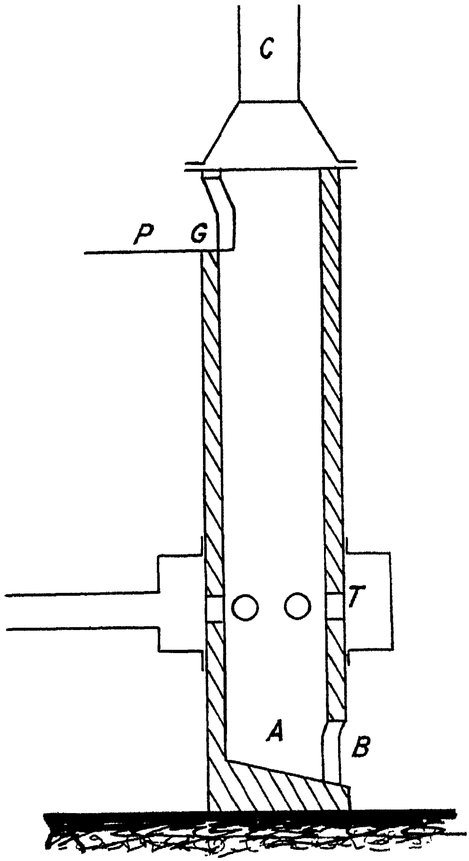



Fig. 2.
Coupe d'un cubilot.

Des tuyères T (6 à 10) partent d'une boite à vent circulaire recevant l'air généralement froid de la soufflerie.

Le trou de coulée est à la partie inférieure.

Le cubilot est chargé par le gueulard de lits alternatifs de fonte de coke et de castine.

La castine a un rôle scorifiant et de plus retient le soufre apporté par le coke.

La production horaire est de 3 à 4 t de fonte consommant 70 à 100 kg de coke et 25 kg de castine par tonne de fonte.

A noter que dans le cubilot, le coke ne sert qu'au chauffage. Par mesure d'économie, on cherche à produire de l'acide carbonique et non de l'oxyde de carbone, ce que l'on obtient par un grand tirage et par une insufflation d'une grande quantité d'air.

La nuance de la fonte peut se modifier en deuxième fusion par des additions convenables (riblons de fer, ferro-silicium, etc...).

La fonte est moulée en sable ou en coquille.

## CLASSIFICATION DES FONTES

La classification des fontes est basée sur la composition chimique.

On distingue les fontes *ordinaires* et les fontes *spéciales*.

Est considérée comme fonte ordinaire ou primaire toute fonte contenant :

$$
\begin{aligned}
\text{Mn} &\leqslant 5\% \\
\text{Si} &\leqslant 5\% \\
\text{P} &\leqslant 0,5\% \\
\text{S, Cr, Ni, Cu, etc...} &\leqslant 0,02\%
\end{aligned}
$$

Comme *fonte spéciale*, toute fonte contenant des teneurs supérieures d'un ou plusieurs éléments.

On distinguera les fontes *binaires*, *ternaires*, etc...

A. *Fontes ordinaires.* — Leur composition moyenne est la suivante :

| | |
|---|---|
| Carbone | de 2,3 à 5% |
| Silicium | de 0,3 à 3% |
| Manganèse | de 0,1 à 4% |
| Phosphore | de 0 à 2,5% |
| Soufre | moins de 0,2% |

*État du carbone dans les fontes.* — Le carbone peut se présenter sous les état suivants :

État de graphite disséminé dans la masse.

État de cémentite $Fe^3C$ ou carbone combiné.

État de solution solide de carbone dans le fer.

L'état de graphite appartenant à l'équilibre stable est favorisé par un refroidissement lent (moulage au sable).

Le silicium favorise le dépôt graphitique. Il chasse le carbone en solution dans le fer et le précipite à l'état de graphite.

A noter que le manganèse agit en sens inverse et s'oppose à cette précipitation.

On peut donc jouer des 3 facteurs :

Vitesse de refroidissement { lente, moulage au sable. / rapide, moulage en coquille.

Silicium,

et manganèse.

pour modifier l'état du carbone dans la fonte.

Le soufre favorise la formation de cémentite.

C'est ainsi qu'on peut avoir des fontes blanches et des fontes grises et des fontes intermédiaires.

*Fontes blanches.* — Le carbone est à l'état de carbone de trempe.

Les proportions de carbone, graphite, silicium et manganèse sont *en moyenne* les suivantes :

| | |
|---|---|
| Carbone | 2,5 à 3% |
| Graphite | 0% |
| Silicium | 0,5% |
| Manganèse | 1% |

*Fontes grises.* — Le carbone se trouve partiellement tout au moins, à l'état de graphite, le reste du carbone étant à l'état de carbone de trempe ou de carbure de fer $Fe^3C$.

Le grain est gros.

La principale cause tendant à provoquer la précipitation du graphite est le silicium.

On a constaté que si on enlève à une fonte une partie de son silicium, sans faire varier la teneur des autres éléments, elle redevient blanche et inversement.

Dans ces fontes grises, les proportions de carbone, graphite, silicium et manganèse, sont les suivantes :

| | |
|---|---|
| Carbone total | 2,7 à 4% |
| Graphite | 2,5 à 3% |
| Silicium | 0,8 à 1,5% |
| Manganèse | 0,5 à 1,0% |

*Fontes intermédiaires.* — Elles sont comprises entre les fontes grises et les fontes blanches. Elles sont truitées (taches grises sur fond blanc ou inversement) ou rubannées (séparation du gris et du blanc en zones bien tranchées).

La teneur moyenne de ces fontes est la suivante :

| | |
|---|---|
| Carbone . . . . . . . . . | 3,5 |
| Graphite. . . . . . . . . | Proportions variables |
| Silicium . . . . . . . . . | 2 % |
| Manganèse . . . . . . . | 2 % |

*Phosphore, élément de classification.* — On a quelquefois classé les fontes ordinaires d'après leur teneur en phosphore, en dénommant *hématites* les fontes contenant moins de 0,15 % de phosphore, et *phosphoreuses*, celles en contenant davantage.

C'est ainsi qu'en admettant le graphite constant, les fontes grises ont été divisées en :

| *Fontes au bois :* | |
|---|---|
| Hématites supérieures . . . . . | (P < 0,05) |
| Hématites ordinaires . . . . . . | (P de 0,05 à 0,15) |
| Fontes phosphoreuses. . . . . . | (P > 0,2) |

B. *Fontes spéciales.* — On désigne sous le nom de fonte spéciale toute fonte qui contient un des éléments silicium, manganèse, chrome, nickel, etc... en proportion plus considérable que celle qui est indiquée plus haut.

Quand ces teneurs sont très considérables, on aboutit aux ferro-silicium, ferro-manganèse, ferro-chrome, ferro-nickel, etc...

Si l'on prend comme constituant spécial le manganèse, nous avons :

| | |
|---|---|
| Pour < 4 % de manganèse. . . | fonte ordinaire |
| 4 % à 7 % . . . . . . . . | fontes manganésées |
| 7 % à 25 % . . . . . . . . | spiegels |
| 25 % à 99 % . . . . . . . . | ferro-manganèses. |

Dans ces produits, la majeure partie du carbone existe à l'état combiné, le manganèse élevant le point de saturation du fer par le carbone.

Nous verrons ultérieurement la fabrication de ces ferros.

Parmi les fontes spéciales, il y a lieu de signaler la *fonte aciérée.*

*Fonte aciérée.* — L'artillerie a cherché à obtenir un métal assez résistant pour supporter les pressions dans l'âme de la pièce et suffisamment fragile pour se fragmenter en un grand nombre d'éclats.

La composition chimique paraissant la meilleure pour résoudre ce problème est la suivante :

| | |
|---|---|
| Carbone *total* . . . . . . . . . | de 2,75 à 3,25% |
| Carbone combiné. . . . . . . | — au moins 20% et pouvant aller avantageusement jusqu'à 50% du carbone total |
| Silicium . . . . . . . . . . . | 1,50 à 1,25% |
| Carbone total + Silicium. . . | 4,4 à 4,5 % |
| Manganèse. . . . . . . . . . | de 0,7 à 1% |
| Phosphore . . . . . . . . . . | 0,2 |
| Soufre. . . . . . . . . . . . | 0,08 |
| Résistance à la traction. . . . | 25 kg |
| Resistance à la compression. | 100 kg |

La résistance au choc est supérieure de 50 % à celle de la fonte ordinaire.

Cette fonte s'obtient en mélangeant :

40 % de fonte hématite,

40 % de métal provenant de coulées antérieures (obus rebutés),

20 % de déchets d'acier dur ou 1/2 dur.

La mise au point se fait par addition de ferro-manganèse ou ferro-silicium.

On peut d'ailleurs réaliser sensiblement les mêmes structures et propriétés, sans addition d'acier, en réglant convenablement la composition des charges et le mode de refroidissement.

*Classification suivant emploi.* — Suivant leur emploi, les fontes peuvent être classés en fontes de moulage et fontes d'affinage.

*Fontes de moulage.* — On choisit parmi les fontes précédemment indiquées, celle qui répond le mieux au but proposé. Si un usinage est prévu, on emploie une fonte douce; si la pièce doit supporter des efforts importants, on emploiera une fonte plus dure; si la résistance est recherchée, on aura recours aux fontes hématites.

Une fonte phosphoreuse donnant de la fluidité au métal, facilitera le moulage, mais ne sera employée que si la fragilité n'est pas à craindre.

*Fontes d'affinage.* — Ces fontes servent à la fabrication de l'acier et leur composition chimique dépendra du but recherché et du mode d'élaboration de l'acier.

Dans la marche « acide », par exemple, la fonte ne devra contenir que des traces de phosphore et de soufre, tandis que dans la marche « basique », elle pourra contenir une proportion quelconque de phosphore.

*Fonte malléable.* — C'est une fonte décarburée superficiellement, ce qui rend la surface malléable, l'intérieur de la pièce de fonte n'étant pas modifié.

Pour obtenir cette décarburation superficielle, on chauffe à 1.000° pendant 4 ou 5 jours, dans des caisses métalliques les objets en fonte, après les avoir entourés d'un oxyde de fer qui décarbure la surface.

La décarburation atteint 4 ou 5 cm de profondeur.

Le métal qui était dur, fragile, devient malléable et peut être travaillé à l'outil.

A un allongement pour ainsi dire nul, a succédé un allongement de 7 à 8 %.

La fonte de départ est en général une fonte blanche peu carburée, peu siliceuse et exempte de soufre et de phosphore, la présence de ces corps empêchant d'obtenir la malléabilité recherchée.

En Amérique, on emploie le procédé suivant pour malléabiliser les fontes.

Par traitement spécial, on transforme tout le carbone en graphite en rendant ainsi la structure complètement homogène. On a un métal facile à travailler et associant à une résistance de 35 à 40 kg, un allongement de 12 à 14 %.

Il faut évidemment avoir recours à des fontes particulières, peu carburées, assez siliceuses pour favoriser la formation du graphite et utiliser un recuit en vase clos durant plusieurs jours, suivi d'un refroidissement excessivement lent (5 à 10° à l'heure) surtout au passage du point de transformation (690°).

*Fonte synthétique.* — Au four électrique, on fabrique des fontes synthétiques, en utilisant des matières premières de grande pureté de façon à avoir des fontes aussi pures que possible.

On introduit dans le four, des déchets d'acier, du coke, du silicium et du manganèse à l'état de ferros.

# TITRE IV

## CHAPITRE IV

## FER

### I. — Propriétés générales

Le fer pur a une densité de 7,87. Il fond à 1.505°.

Le « fer », au sens commercial du mot, se distingue de l'acier par sa faible teneur en carbone et surtout par son mode d'élaboration.

Pratiquement, dès 0,1 de carbone, l'acier fait son apparition, la trempe commençant à se manifester.

Comme l'acier, le fer contient du manganèse et du silicium et les impuretés soufre et phosphore.

On distingue le fer *à nerfs* très peu carburé, particulièrement forgeable et soudable, et le fer *à grains* plus carburé et qui a une texture analogue à celle de l'acier.

La production du fer est d'environ 1 % de celle de l'acier. Elle diminue de plus en plus.

### II. — Élaboration du fer

Le fer est obtenu *directement* par la méthode catalane, méthode préhistorique, qui consiste à mettre le minerai de fer au contact du combustible (charbon de bois).

L'oxyde de fer réduit donne un produit plus ou moins pâteux mélangé de scories dont on se débarrasse par martelage.

Il est obtenu indirectement par l'affinage de la fonte.

*a*) au bas-foyer;

*b*) au four à puddler.

a) *Bas-foyer.* — Méthode n'ayant plus qu'un intérêt historique (Procédé comtois). Dans les régions riches en minerais purs, on obtenait, par ce procédé, les *fers au bois.*

La fonte était mise au contact du charbon de bois. Le vent était soufflé sur la fonte liquéfiée, et la décarburation de celle-ci s'opérait. Le fer ainsi obtenu était utilisé pour la fabrication de l'acier au creuset.

Le foyer était alimenté à la houille. Les gaz, avant d'aller à la cheminée, passaient sous des chaudières pour récupérer la chaleur.

b) *Four à puddler* (fig. 3). — La sole du laboratoire est constituée par de l'oxyde de fer.

Par l'atmosphère oxydante du laboratoire, il y a oxydation du carbone, du manganèse, du silicium, du phosphore et du soufre.

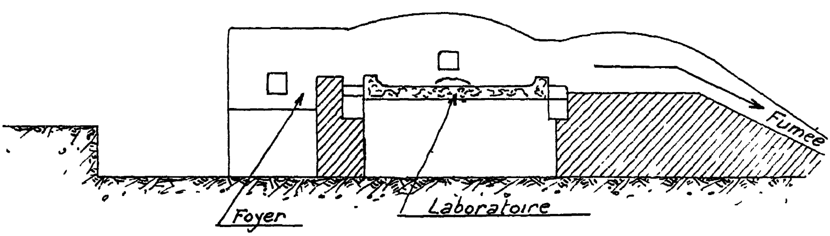



Fig 3.

Four à Puddler.

Les produits de l'oxydation s'échappent à l'état gazeux ($CO, CO^2$) ou forment une scorie.

La température de four est de 1.300° à 1.400° au lieu de 1.600° à 1.800° dans les fours à acier.

Le métal, au fur et à mesure de l'affinage devient pâteux.

Le fer ou l'acier puddlé ainsi produit dont la température de de fusion (environ 1.500°) est supérieure à celle de la fonte, se ramasse en grumeaux.

L'oxyde de fer qui se produit ne se dissout pas dans le métal affiné, mais reste dans la scorie.

A l'aide d'un ringard actionné par le puddleur ou mécaniquement, les grumeaux sont rassemblés en boules appelées « *loupes* ». Ces loupes, d'un poids d'environ 50 kg, sont *cinglées* sous un pilon. Les scories sont ainsi expulsées.

La *loupe* après cinglage devient un *massiau*.

Ces massiaux sont réchauffés à haute température dans les fours à puddler, puis remis au pilon pour expulser les dernières scories et pour recevoir la forme voulue.

On a ainsi un produit très pur qui a l'inconvénient de coûter cher.

*Classification des fers.* — La classification des fers est basée sur la résistance à la traction et l'on admettra les quatre nuances des Compagnies de chemins de fer :

$$R = 30,\ 32,\ 34,\ 37 \text{ kg}.$$

(Définition Standard, fascicule $A_I$ 2 de la Commission permanente d'Unification, 4 juin 1920.)

*Fer électrolytique.* — Le fer électrolytique est un produit d'un très haut degré de pureté, obtenu par électrolyse en anodes solubles sur cathode mobile.

Les anodes sont des plaques ou des déchets de fonte ou d'acier; l'électrolyte est une solution neutre de sulfate ferreux; les cathodes sont cylindriques et tournent autour de leur axe disposé horizontalement; elles ne plongent que partiellement dans le bain.

Parfois, les cathodes sont planes et oscillent autour d'un axe horizontal extérieur au bain.

La solution électrolytique est maintenue à l'état neutre grâce à une circulation constante et un passage sur des tournures de fer; elle reçoit des additions périodiques d'un dépolarisant ayant pour but l'élimination, du moins partielle, de l'hydrogène restant à l'état occlus dans le fer *déposé*.

On travaille sous une densité de courant de 10 ampères environ par décimètre carré, en bain chaud.

Le fer électrolytique atteint les puretés suivantes :

$$\begin{aligned} C &\leqslant 0.004 \\ Si &\leqslant 0.007 \\ S &\leqslant 0.006 \\ P &\leqslant 0.00 \end{aligned}$$

Le rendement de l'opération est de 2 t environ de métal par kilowatt-an, y compris les dépenses électriques accessoires comme celle d'entraînement des cathodes mobiles.

Le fer électrolytique renferme toujours, à l'état brut, des quantités importantes d'hydrogène qui le rendent très dur et très fragile; on remédie à ce défaut par un recuit de 30 à 40 minutes vers 1.000°; la quasi-totalité du gaz est expulsée par ce traitement.

Le produit est obtenu sous forme de tubes dont l'épaisseur peut atteindre 7 à 8 mm; on peut réaliser des tôles en ouvrant ces tubes le long d'une génératrice et les planant.

Les propriétés essentielles du fer électrolytique découlent de sa haute pureté : ce sont surtout ses qualités magnétiques extrêmement élevées, et sa résistance relative à la corrosion; on peut également l'utiliser pour la fabrication d'alliages de grande pureté, comme certains alliages fer-nickel recherchés pour leurs propriétés magnétiques.

Malheureusement, ce mode d'élaboration entraîne un prix de revient fort élevé qui empêche le développement de ce métal.

*Le fer Armco.* — Le fer dont la fabrication a été étudiée par l'Américan Rolling Mill Company, dit fer Armco, est un produit lui aussi de grande pureté, mais fabriqué au four Martin basique. La conduite de l'opération a certains points de similitude avec la conduite de l'opération Martin ordinaire pour la fabrication de l'acier extra doux, avec cependant de nombreuses et importantes différences.

1° *Qualité des matériaux à employer pour la charge.* — Il est indispensable d'avoir des fontes et des riblons spéciaux d'une très grande pureté et d'éliminer les matières contenant des quantités importantes de manganèse, de silicium ou de cuivre. On emploie autant que possible des fontes sélectionnées pour cet usage et des chutes de fer Armco provenant d'opérations précédentes.

2° *Conduite de l'opération.* — L'opération doit être poussée beaucoup plus loin que la fabrication d'acier ordinaire.

Au moment où le métal en fusion dans le four arrive approximativement à la composition à laquelle on coule l'acier ordinaire, on le soumet à une opération de sur-affinage qui a pour but d'éliminer les impuretés qui se trouvent encore, à ce moment-là, pré-

sentes dans le bain. Cette opération de sur-raffinage exige des additions importantes d'oxyde de fer, de façon à oxyder le carbone et le manganèse, ainsi que de chaux, de façon à scorifier le soufre et le phosphore.

La difficulté se complique du fait que le point de fusion du fer pur Armco est de 100° environ supérieur à celui de l'acier ordinaire, ce qui oblige à prolonger dans de grandes proportions la durée normale de l'opération, et ce, dans des conditions particulièrement néfastes à la durée du four, c'est-à-dire haute température et laitier très chargé en oxyde de fer, réagissant par conséquent violemment sur le revêtement et sur la sole du four. Il est donc indispensable de posséder des fours à très grande puissance de chauffe et de réparer et d'entretenir les revêtements d'une manière particulièrement soignée.

Lorsque le métal a atteint la composition voulue et la température nécessaire à la coulée, on le soumet alors à la dernière phase de l'opération qui est la phase de désoxydation.

Ceci est obtenu par des additions appropriées de désoxydants énergiques tels que par exemple l'aluminium. Des précautions doivent être prises regardant la température de coulée et la vitesse de remplissage des lingotières, de manière à permettre une dégazéification convenable.

3° *Transformation.* — Lorsque le lingot est solidifié et prêt pour le laminage, il faut faire attention de ne pas laminer le métal entre 850° et 1.050°, cette zone étant une zone critique de température caractéristique du fer pur.

La précaution de ne jamais travailler le fer Armco dans cette zone doit être observée par la suite toutes les fois qu'on doit faire subir au métal des travaux de cambrage, formage, rivetage, etc., car son inobservance produirait des criques extrêmement importantes.

La composition normale du fer Armco est la suivante :

| | |
|---|---|
| C < 0.010 | S < 0.025 |
| Mn < 0.025 | P < 0.005 |
| Si < 0.05 | Cu < 0.050 |

Cette pureté et l'absence corrélative d'inclusions non métalliques communique au métal un degré élevé de résistance à la cor-

rosion : il se recouvre bien d'une couche mince de rouille, très uniforme et continue, mais l'attaque s'arrête là ; on ne constate pas, comme dans les produits ferreux courants, d'attaques locales intenses avec aspects pustulaires.

Les propriétés magnétiques sont elles aussi très intéressantes et dictent l'emploi pour la fabrication de relais, matériels téléphonique et télégraphique, armatures d'électros, etc.

Enfin, ce métal est utilisé comme matière première, en lieu et place du fer de Suède, pour l'élaboration des aciers spéciaux de qualité : aciers à haute teneur en nickel ou en chrome, aciers à coupe rapide, etc.

TITRE V

# ACIERS

CHAPITRE V

## ÉLABORATION

### Propriétés générales.

Les aciers étant des produits particulièrement complexes, leurs propriétés respectives seront examinées au cours de l'étude de chacun d'eux.

### Production mondiale.

Elle est de l'ordre de 107 millions de tonnes annuelles (statistique de 1928).

| | | |
|---|---|---|
| États-Unis. . . . . . . . . . . . . . | 52,0 | millions |
| France. . . . . . . . . . . . . . . . | 9,3 | — |
| Sarre . . . . . . . . . . . . . . . . | 2,0 | |
| Luxembourg . . . . . . . . . . . . . | 2,6 | - |
| Allemagne . . . . . . . . . . . . . . | 14,3 | |
| Angleterre . . . . . . . . . . . . . . | 8,6 | |
| Belgique. . . . . . . . . . . . . . . | 3,9 | -- |
| Tchécoslovaquie . . . . . . . . . . . | 1,7 | -- |
| Russie. . . . . . . . . . . . . . . . | 3,0 | — |
| Italie . . . . . . . . . . . . . . . . | 1,8 | — |
| Pologne . . . . . . . . . . . . . . . | 1,3 | — |
| Japon. . . . . . . . . . . . . . . . | 1,6 | -- |

## Procédés d'élaboration des aciers.

L'étude des différents procédés d'élaboration aura pour but unique de mettre en évidence leur influence sur la qualité du métal produit.

§ 1. Généralités sur la fabrication des aciers. — Matières premières utilisées : fontes, riblons d'acier, tournures d'acier, fers, ferro-alliages, oxydes naturels, etc...

La composition de la charge d'un four en matières métalliques est constituée par des alliages de fer et d'autres corps simples tels que le carbone, le silicium, le manganèse, le soufre, le chrome, etc...

L'opération peut se résumer comme il suit :

1° *Période d'oxydation.* — Élimination par oxydation à haute température de certains corps simples, la charge étant portée à l'état liquide.

L'oxygène est fourni par l'air qui traverse le bain de métal liquide, par l'atmosphère oxydante du four et par des oxydes introduits dans la charge (minerai de fer ou tournures de fer rouillées).

Les produits de cette oxydation, ou partent à l'état gazeux dans l'atmosphère du four (oxyde de carbone ou acide carbonique) ou, étant donnée leur densité, se réunissent à la surface du bain en formant un laitier (oxydation du silicium, du manganèse, du phosphore).

2° *Période de désoxydation.* — Le fer est en partie à l'état d'oxyde, soit à cause du chargement initial, soit par suite d'une oxydation survenue à la période précédente.

La désoxydation s'opère par l'action de corps simples réducteurs introduits dans la charge.

3° *Période de dosage.* — On communique au bain, suffisamment débarrassé d'impuretés et d'oxydes, la composition chimique de l'acier désiré.

Ceci s'obtient par l'introduction des ferro-alliages et métaux qui permettent d'avoir la teneur désirée en carbone, manganèse, silicium, chrome, nickel, etc.

§ 2. Procédés d'élaboration suivant les divers fours employés. — Les types de fours sont les suivants :

1° Convertisseurs,
2° Fours Martin,
3° Fours électriques,
4° Fours à creusets.

### 1° Convertisseur

C'est une grande cornue à garnissage intérieur en briques réfractaires, mobile autour d'un axe horizontal permettant de la remplir et de la vider. (Voir fig. 4 la coupe d'un convertisseur.)

L'injection de l'air se fait par le fond. Cette injection se fait latéralement, à travers les parois, dans les petits convertisseurs.

La capacité du convertisseur varie de quelques centaines de kilos à plusieurs tonnes (35 t).

*Matière première introduite.* — Fonte liquide.

*Période d'oxydation.* — Obtenue par soufflage amenant la diminution des teneurs en carbone, manganèse, silicium, phosphore, soufre. Le Si et le Mn brûlent d'abord.

C'est la période des étincelles qui dure de 10 à 12 minutes.

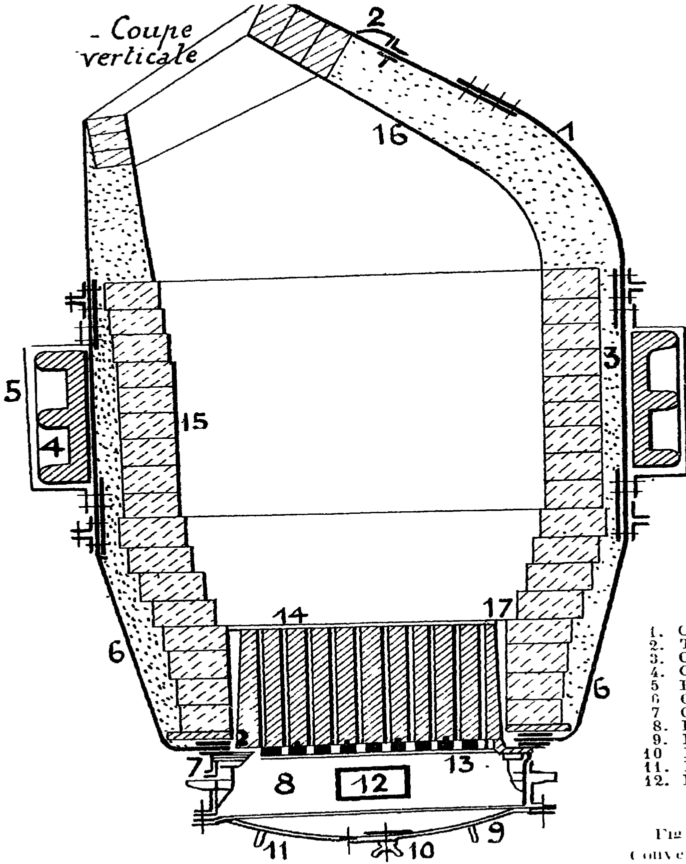
Puis vient la période d'oxydation du carbone caractérisée par des flammes blanches dues à la combustion de l'oxyde de carbone. Cette période dure environ 15 minutes.

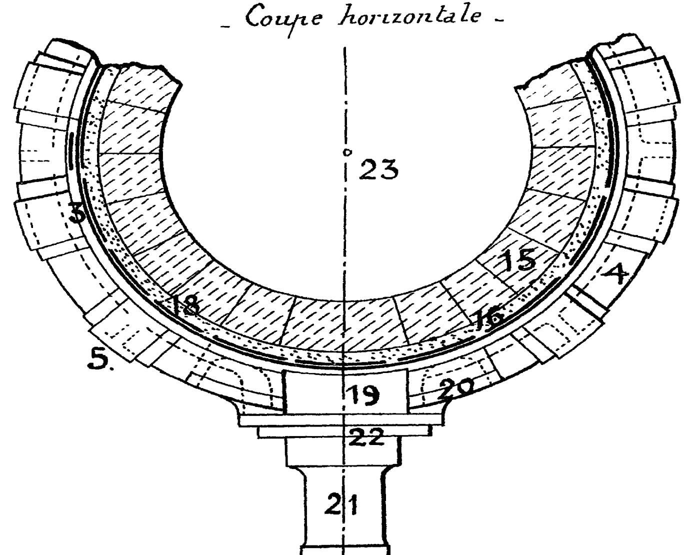
Enfin, c'est le fer qui brûle à son tour.

Il faut noter que les chaleurs dégagées par ces oxydations successives, permettent d'élever progressivement la température du bain, depuis celle de la fusion de la fonte, jusqu'à celle de la fusion du fer, assurant ainsi la liquidité continue du bain.

C'est la combustion du silicium qui fournit le plus de calories, après vient la combustion du carbone en $CO^2$, celle du phosphore, du manganèse, du fer et en tout dernier lieu, celle du carbone en CO qui fournit très peu de calories. Indépendamment de toute question d'affinage, la présence de quelques-uns de ces éléments est indispensable pour la marche thermique de l'opération.

*Période de désoxydation.* — L'oxygène de l'air de soufflage a non seulement attaqué les éléments les plus oxydables, mais encore, comme nous l'avons dit, le fer, moins oxydable. Il s'est produit éga-




1. Cuirasse de la panse et du bec.
2. Tôle bavette.
3. Cuirasse de la partie cylindrique
4. Ceinture en fonte.
5. Étrier d'attache de la ceinture.
6. Cuirasse de la partie inférieure
7. Couronne d'attache de la boite à vent
8. Boite à vent.
9. Plaque de fond de la boite à vent
10. Regard de la plaque de fond
11. Poignée de manœuvre.
12. Buse du tuyau de vent.
13. Plaque support de fond
14. Fond à trou pour le soufflage
15. Brique.
16. Pisé.
17. Joint roulé.
18. Fourrure d'attache.
19. Emban carré des tourillons
20. Équerre de centrage
21. Tourillon à vent.
22. Frette d'assemblage
23. Fond du convertisseur

Fig 4

Convertisseur.

lement une décarburation plus ou moins complète. On ajoute alors des ferro-alliages contenant du carbone, du manganèse, etc..., corps réduisant l'oxyde de fer, très préjudiciable, et élevant les teneurs en carbone, manganèse, silicium.

Les deux principaux agents de désoxydation sont le manganèse et le silicium, sous forme de ferros.

Le ferro-manganèse ajouté est du ferro-manganèse à 80 % fortement carburé et apte à jouer les rôles de désoxydant et de recarburant.

Le silicium qui est un désoxydant énergique a également l'avantage d'absorber les gaz, dont l'occlusion déterminerait les soufflures

C'est souvent ce rôle exclusif qui est dévolu au silicium. On évite ainsi de forcer la teneur des aciers en silicium. Une trop forte teneur en ce corps diminue, en effet, l'aptitude des aciers au forgeage.

Étant donné le résultat recherché, il y a donc une étude qualitative et quantitative sur les ferros à employer.

L'opération est très rapide (une demi-heure) et malgré tout ne permet pas une parfaite désoxydation.

C'est un défaut de la méthode du convertisseur.

Il y a les convertisseurs *acides* dont le garnissage est en briques siliceuses. Dans ces convertisseurs, le phosphore de la fonte ne peut s'éliminer par suite de l'acidité du milieu. Les oxydes de Mn et Si forment, avec la silice du garnissage, une scorie à réaction acide qui vient surnager le bain. L'acide phosphorique ne peut s'éliminer à l'état de phosphate. Il est réduit par le carbone, et le phosphore vient se réincorporer au bain. Étant donné la nocivité du phosphore, on ne peut traiter au convertisseur acide des fontes phosphoreuses.

Il y a les convertisseurs *basiques* dont le garnissage à réaction basique est en magnésie ou en dolomie (carbonate double de calcium et de magnésium $CO^3Mg + CO^3Ca$). On ajoute de la chaux. Dans ces convertisseurs, le phosphore s'élimine très bien, car l'acide phosphorique résultant de l'oxydation est immédiatement absorbé par la scorie très basique qui surnage le bain. Cette scorie calcaire permet bien mieux l'élimination du soufre.

On traite au basique, des fontes peu siliceuses; la présence de silicium en grande quantité empêcherait la déphosphoration. Ce corps absorberait la chaux pour former du silicate de chaux, et attaquerait le garnissage de la cornue.

La période de déphosphoration a lieu après celle de décarburation. Le carbone, en effet, réduit l'acide phosphorique dès sa formation et fait retourner le phosphore dans le bain avant qu'il y ait formation de phosphate de chaux.

Notons que le silicium devant être peu abondant, comme nous l'avons vu, on ne peut compter sur lui pour réchauffer le bain, comme dans le convertisseur acide. C'est au phosphore que ce rôle est dévolu, ce qui exige des minerais phosphoreux traités au basique, un minimum de phosphore (1,7 à 1,8) faute de quoi on serait obligé d'ajouter du phosphate de chaux. Le minerai lorrain contient cette proportion de 1,8 de P.

La décarburation est donc complète et une addition de ferro-manganèse devient indispensable pour assurer la désoxydation et la recarburation désirées.

Cette addition ne doit avoir lieu qu'après avoir décrassé le bain, c'est-à-dire enlevé la scorie; sans quoi l'acide phosphorique de la scorie serait réduit par le carbone du ferro-manganèse et le phosphore retournerait dans l'acier.

En résumé, le convertisseur acide (Bessemer) utilise les fontes siliceuses et non phosphoreuses.

Le convertisseur basique (Thomas) utilise les fontes phosphoreuses et peu siliceuses. Le mode de traitement Thomas et Gilchrist remonte à 1875.

## 2° Fours Martin-Siemens

Les matières premières sont déposées sur la sole d'une chambre appelée « laboratoire du four ».

L'énergie calorifique nécessaire à la fusion et à la marche de l'operation est fournie par la combustion, à leur contact, d'un mélange de gaz et d'air. En modifiant la combustion du mélange gazeux, on peut créer dans le four une atmosphère plus ou moins oxydante.

Les gaz provenant généralement du charbon contiennent du soufre, élément nuisible à la qualité de l'acier.

Tous les procédés peuvent se résumer en deux :

— Procédé « fonte liquide-minerai », dit « *ore process* ».

— Procédé « fusion simple » d'un mélange de fonte, et de déchets d'acier ou riblons, dits « scraps ». C'est le « *scraps process* ».

*Procédé « fonte liquide-minerai ».* — La matière première introduite est la fonte liquide.

On retrouve la période d'oxydation réalisée par l'atmosphère du four et qui diminue les teneurs en carbone, manganèse, silicium, phosphore, soufre.

Du minerai et des oxydes ajoutés dans le bain activent l'opération.

A la fin de cette opération, on a forcément de l'oxyde de fer.

*Procédé « fusion simple ».* — La charge introduite dans le four ne contient aucun élément nuisible.

Il s'agit d'en réaliser la fusion.

Pour éviter l'oxydation, on cherche à réaliser une atmosphère peu oxydante et l'on introduit dans la charge de la fonte, des ferro-alliages, du coke, matières contenant du silicium, du manganèse et du carbone, et d'autres corps plus oxydables que le fer, qui réduisent l'oxyde de fer.

Des additions de fonte, ferro-alliages, métaux spéciaux, permettent ensuite d'amener l'acier à avoir les teneurs voulues en carbone, manganèse, silicium, nickel, chrome, etc...

Même division que pour les convertisseurs en fours *acides* et en fours *basiques*, ces derniers éliminant le phosphore et même le soufre grâce à l'emploi d'une scorie calcaire.

La durée de l'opération est de 5 à 8 heures.

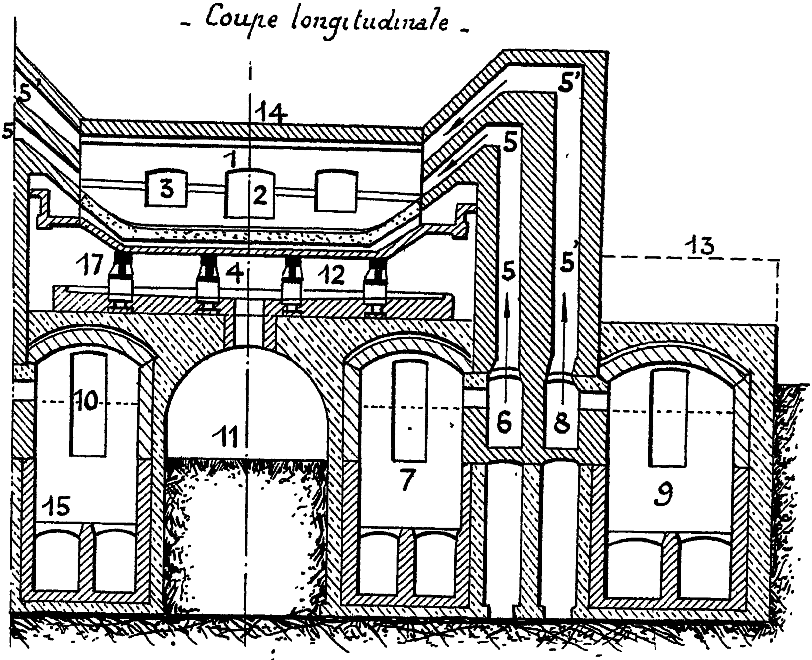
Il faut noter que dans l'*allure acide*, la décarburation peut être arrêtée quand on veut. En limitant cette décarburation, on arrête les pertes par oxydation du fer et on empêche l'usure de la paroi siliceuse.

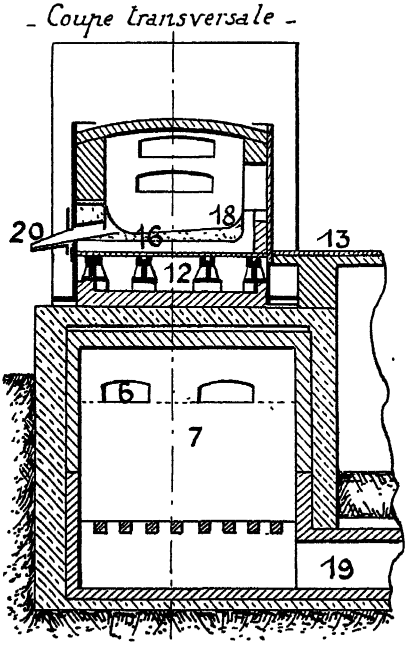
L'allure acide est donc avantageuse pour les aciers durs.

Dans l'*allure basique*, au contraire, il faut complètement décarburer pour obtenir la déphosphoration. Il y aura forcément des pertes par oxydation du fer. On aura facilement des aciers très doux. Pour avoir des aciers plus durs, on sera obligé de recarburer.

Citons encore le procédé Talbot qui cherche à maintenir la température du four en laissant dans ce four, à chaque coulée, une partie de la charge qu'il contient. On a recours à un four oscillant à grande capacité.

La marche est continue. Le chargement se compose de fonte liquide, minerai et castine. C'est un procédé intermédiaire entre le convertisseur et le Martin.




1. Laboratoire
2 Porte de décrassage
3. Portes de chargement
4 Armature de sole
5 Carneaux à gaz
5'. Carneaux à air
6. Chambres de sûreté des chambres à gaz.
7 Chambre à gaz
8 Chambres de sûreté des chambres à air.
9 Chambres à air
10 Portes des chambres
11 Galerie de décrassage
12. Cuvettes de sûreté
13. Plancher des fours
14 Briques
15 Briques de silice ordinaire
16. Briques de magnésie
17. Fer chromé
18. Pisé de dolomie.
19. Carneaux allant à la cloche.
20. Chenal de coulée.

Le gaz et l'air sont préalablement chauffés à 700-800° par passage à travers les empilages de briques des chambres à gaz et à air portées à haute température. La température de 1600 à 1800° nécessaire à l'opération ne serait pas atteinte par combustion du même mélange gazeux froid. Toutefois, si l'on emploie des gaz naturels à haut pouvoir calorifique, on ne réchauffe que l'air, les hydrocarbures seraient décomposés dans les chambres. Périodiquement l'on inverse le sens des courants gazeux, si bien qu'alternativement les chambres cèdent de la chaleur et sont réchauffées par les fumées.

Fig. 5.

Four Martin.

Le procédé Berthand-Thiel utilise deux fours Martin, le premier assurant en gros la déphosphoration et produisant le gros des scories, le second débarrassé des scories achève la déphosphoration et la décarburation.

On peut d'ailleurs combiner le convertisseur et le Martin, le Talbot et le Martin, le four basique et le four acide.

*Consommation de charbon.* — Elle est d'environ 250 à 300 kg par tonne d'acier produite au four basique.

### 3° Fours électriques

Les matières premières de la charge solide ou liquide sont déposées sur la sole du laboratoire, et l'énergie calorifique nécessaire à leur fusion et à la marche de l'opération est fournie par l'électricité.

L'atmosphère du four, qui est sensiblement une chambre close, ne joue plus de rôle important.

La température du four électrique est plus élevée que dans les autres appareils, ce qui influe sur les réactions.

Les principaux modèles de fours électriques sont :

Les fours à induction.

Les fours à arc,

Les fours à résistance,

Les fours à résistance et à arc.

*Four à induction.* — Le bain constitue le secondaire d'un transformateur et est chauffé par le courant induit qui circule. Le métal n'est en contact avec aucun autre corps que la sole (voir fig. 6).

*Four à arc.* — La chaleur est dégagée par des arcs éclatant entre les électrodes situées au-dessus de la sole, à une distance telle que, lorsque la charge est fondue, elles se trouvent au-dessus de la surface du bain; ou bien les arcs éclatent entre l'extrémité des électrodes et la scorie qui recouvre le bain (fig. 7 et 8).

*Four à résistance.* — La chaleur est produite par des courants qui traversent des résistances métalliques ou granulaires ; celles-ci fournissent par radiation les calories nécessaires; ou bien c'est la traversée du métal lui-même par le courant qui donne de la

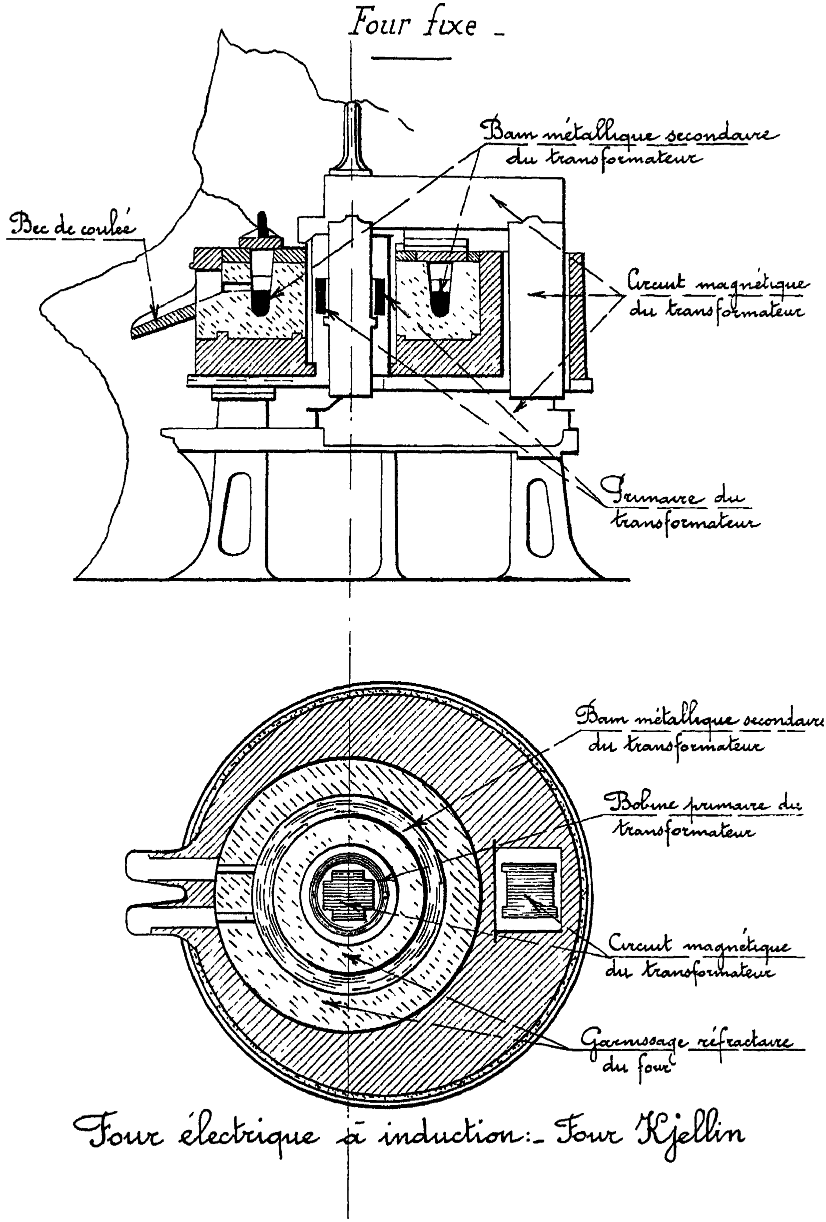



Fig. 6.

Four électrique à induction — Four Kjellin.

chaleur; ces fours à arc fonctionnent ainsi simultanément presque toujours avec effet Joule : ce sont alors les *fours à résistance et à arc* (fig. 7 et 8).

Le courant arrive par des électrodes suspendues au-dessus du bain et s'en va par des électrodes noyées dans la sole.

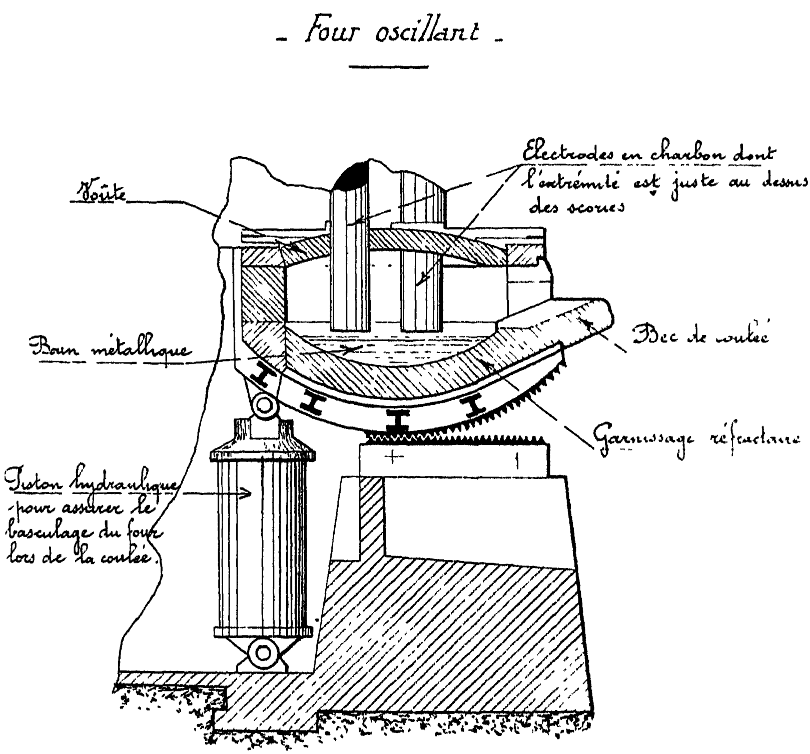



Fig. 7.

Four électrique à arc. — Four Héroult.

La chaleur est produite par des arcs éclatant entre les électrodes et le métal et par les courants traversant le métal pour s'en aller par les électrodes de la sole (Voir fig. 8).

Les fours sont, en général, en garnissage basique.

On retrouve :

1° La période d'oxydation;

2° La période de désoxydation.

1° *Période d'oxydation.* — Consiste dans l'élimination du silicium, du manganèse, du carbone, du phosphore, du soufre de la charge par oxydation qui s'effectue avec du minerai.

Les oxydes produits sont absorbés par une scorie fortement basique obtenue par addition de chaux qu'on enlève à la fin.

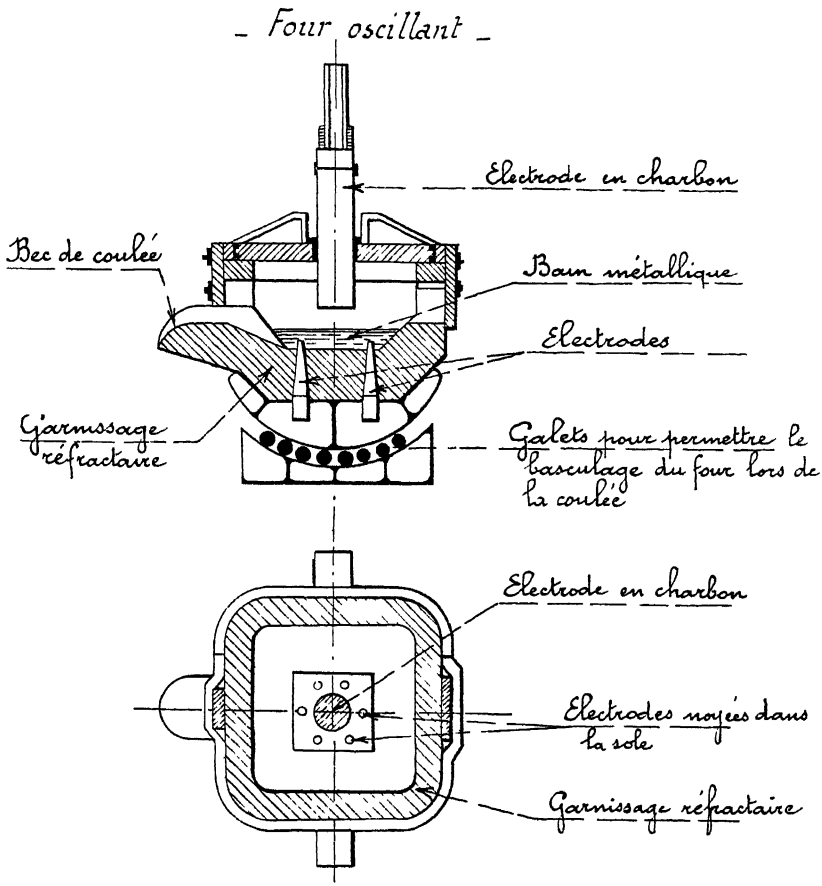



Fig. 8.
Four électrique à résistance et à arc. — Four Girod.

2° *Période de désoxydation.* — On désoxyde le fer et élimine le soufre au moyen d'une scorie formée de chaux, sable et spath fluor dans laquelle on ajoute comme éléments désoxydants du coke de pétrole et du ferro-silicium.

Grâce aux hautes températures réalisées, la désoxydation et la désulfuration au four électrique sont parfaites. On peut, en effet, à ces hautes températures, produire le sulfure de chaux stable en atmosphère réductrice.

C'est là une intéressante caractéristique des fours électriques.

### 4° Fours à creusets

Les matières premières introduites sont, de la fonte très pure, du fer, des riblons, des tournures de choix, des ferro-alliages, des métaux spéciaux, de l'acier cémenté.

Les aciers cémentés employés pour la carburation des aciers au creuset, sont élaborés comme suit :

Des barres de fer très pur sont placées, par lits alternatifs, dans un cément de charbon de bois, renfermé dans des caisses en briques réfractaires qu'on ferme hermétiquement.

Ces caisses sont chauffées dans un four, pendant une vingtaine de jours, à une température de 1.000 à 1.200°.

Le refroidissement dure une huitaine de jours.

On obtient ainsi un acier cémenté, dénommé « *poule* » à cause des nombreuses ampoules qui recouvrent sa surface. Cet acier, pouvant être rendu homogène par corroyage, et mis en petits morceaux, servira au chargement des creusets et permettra d'introduire la quantité désirée de carbone dans l'acier à élaborer sans introduire d'éléments étrangers.

Les creusets, fermés par un couvercle, sont constitués par un mélange d'argile réfractaire et de graphite. Leur contenance varie de 30 à 40 kg.

Le métal n'est donc pas en contact avec l'atmosphère du four. L'opération se fait en vase clos. Très peu d'air entre dans les creusets et l'oxydation des éléments de la charge se fait presque uniquement au détriment de l'oxyde qu'elle contient.

On arrive ainsi à désoxyder très bien l'acier.

De plus, on obtient avec une grande approximation l'acier de composition voulue.

La durée de l'opération est de 5 à 8 heures (Voir fig. 9). Le rendement est 2 à 3 t par four de 20 creusets. La consommation de charbon est de 1.500 kg par tonne d'acier, ce qui élève considérablement le prix de revient.

## Emplois des aciers des divers fours.

L'acier au *creuset*, le plus cher par suite des frais qu'il occasionne et de la pureté des matières premières qu'il exige, n'est utilisé qu'à

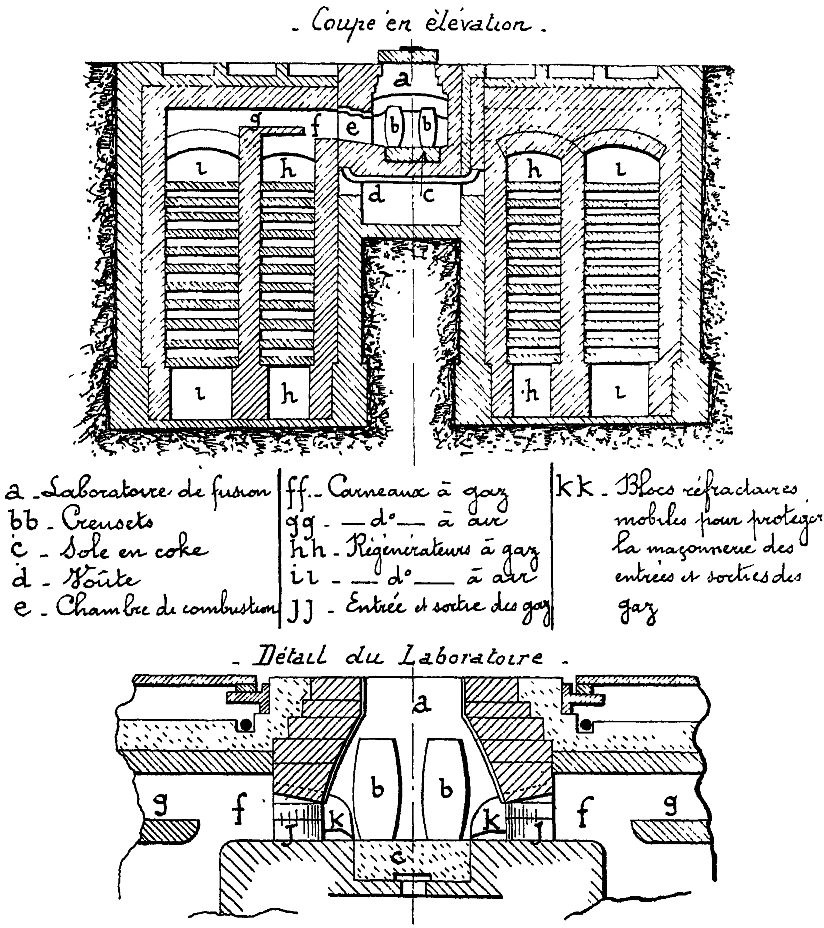



Fig. 9.

Four à creusets de Siémens chauffé au gaz

Le gaz produit par un gazogène et l'air sont préalablement chauffés à 700-800° par passage dans les régénérateurs *h* et *i*. La température de 1600 à 1700° nécessaire à l'opération ne serait pas atteinte dans le laboratoire *a* par la combustion du mélange gazeux froid. Alternativement, les régénérateurs de droite et les régénérateurs de gauche réchauffent le gaz et l'air et sont réchauffés par les fumées sortant du laboratoire et allant à la cheminée.

la fabrication des pièces vendues à un prix élevé et spécialement soignées, telles que : outils, vilebrequins, arbres à cames, cordes à piano, fils d'avions, pièces d'armes, canons de mitrailleuses. La teneur en gaz occlus (hydrogène, azote) paraît plus faible dans les aciers au creuset que dans les aciers sur sole.

La *désoxydation* des aciers au creuset est très bonne. Cette absence quasi totale d'oxydes a fait la réputation de ces aciers.

Il faut ajouter que le procédé au creuset donne de grandes facilités pour obtenir de petites pièces.

L'*acier électrique* tend à faire concurrence au creuset, étant donné les qualités que nous avons constatées.

Le four électrique désulfure très aisément. La désoxydation y est bonne et la teneur en gaz occlus peut y être très réduite.

Le four *Martin acide*, exige des matières pures et exemptes de phosphore.

Le four *Martin basique* se développe de plus en plus. Il donne des produits d'une bonne moyenne quand la marche est habilement conduite.

L'acier de *conversion* est l'acier marchand ordinaire bon pour les rails, poutrelles, bandages, câbles, etc...

## CHAPITRE VI

# LE LINGOT D'ACIER — COULÉE

L'acier provenant du convertisseur, du four Martin, du four électrique ou du four à creuset est coulé en lingotière.

La coulée de l'acier se fait par l'intermédiaire d'une *poche de coulée*, sorte de récipient en tôle garnie d'un revêtement réfractaire.

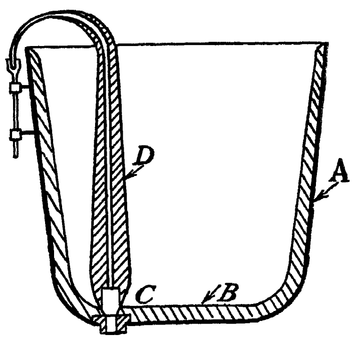



Fig. 10.

Poche de coulée.

*A*. Enveloppe en tôle d'acier.
*B*. Garnissage réfractaire.
*C*. Trou de coulée.
*D*. Quenouille et garnissage réfractaire.

Le fond est percé d'un trou qui peut être ouvert ou fermé, à volonté, par l'intermédiaire d'une tige métallique garnie de terre réfractaire, appelée quenouille (fig. 10).

Les lingotières sont en fonte grise hématite, de forme adaptée au résultat à obtenir.

On transporte la poche remplie d'acier au-dessus de la lingotière et on procède à la coulée qui peut s'exécuter en *descente*, c'est-à-dire de haut en bas, ou en *source*, c'est-à-dire de bas en haut.

Le démoulage est facilité par la forme trapézoïdale de la lingotière. Celle-ci possède des oreilles qui sont saisies par des appareils de levage, en vue du démoulage.

## Défauts du lingot.

*Ségrégation.* — Le phénomène de la liquation amène l'accumulation, dans les régions qui sont restées liquides les dernières, des impuretés telles que le soufre et le phosphore.

C'est le phénomène de la *ségrégation*, défaut chimique du lingot.

Il peut avoir une influence sur les défauts physiques. Les impu-

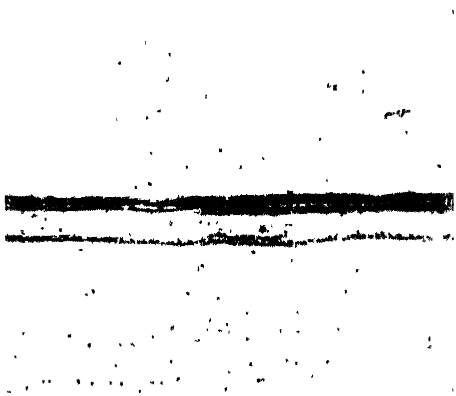


Fig. 11.

Micrographie (sans attaque, grossissement 30) de la surface d'une pièce traversée par une « ligne ». C'est une fissure très fine.

retés, soufre et phosphore, et les inclusions réduisent l'allongement de rupture. Les tapures et déchirures de forge sont facilitées.

D'autre part, les ségrégations locales donnent à l'étirage des alignements d'inclusions (*ghost lines*) qui constituent les *nuances* ou *veines*.

Tandis qu'après étirage la *ligne* constitue un défaut longitudinal continu créé par les soufflures, comme nous le verrons page 55, la *nuance* constitue un défaut longitudinal discontinu (Voir fig. 11 et fig. 12).

En dehors de la ségrégation, défaut chimique, les défauts d'ordre physique se classent comme suit :

1° Les défauts naturels, à savoir :

*a*) la retassure

et *b*) les soufflures;

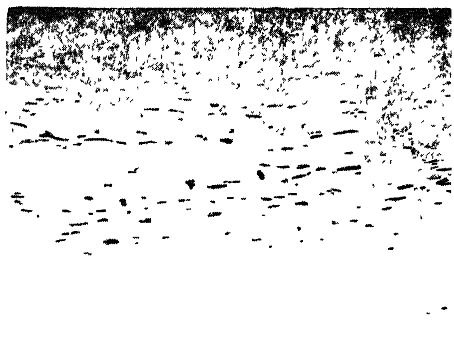


Fig. 12

Micrographie (sans attaque, grossissement 30) de la surface d'une pièce traversée par une « nuance ». C'est un alignement d'inclusions (*ghost lines*)

2° Les défauts accidentels, à savoir :

*a*) les criques,

*b*) les tapures,

*c*) les gouttes froides.

### *1° Défauts naturels.*

*a*) Retassure. — Elle provient du retrait que subit l'acier pendant son refroidissement.

La solidification part de l'extérieur vers l'intérieur.

C'est donc dans l'intérieur que se formera l'entonnoir de retassement ou retassure.

C'est également à la partie supérieure du lingot qu'elle se formera; les masses liquides descendant pour combler les vides qui se forment vers le bas nourrissent le pied du lingot.

Résumons les moyens propres à procurer :

1° La localisation de la retassure,

2° La suppression de la retassure,
3° L'élimination de la retassure.

1° *Localisation de la retassure.* — Le résultat est obtenu en maintenant chaude le plus longtemps possible la partie supérieure du lingot.

*Moyens employés.* — *Emploi de lingotières* ayant leur plus *grande section en haut.*

L'aspect des nos 1, 2 et 3, figure 13, explique le phénomène.

Les nos 4 et 5 le mettent en évidence.

*Vitesse de coulée ralentie.* — Si la vitesse de coulée était égale à la vitesse de propagation de la solidification, le problème serait résolu.

*Réchauffage* par un procédé quelconque de la partie supérieure du lingot et en particulier emploi d'une *masselotte* ou moule en sable porté probablement au rouge avant d'être assemblé avec la lingotière, afin de retarder le refroidissement de l'acier dans la partie supérieure.

2° *Suppression de la retassure.* — S'obtient par un procédé physique consistant à comprimer extérieurement le lingot (Procédé Harmet, procédé Withworth).

3° *Élimination de la retassure.* — S'obtient par un *chutage* suffisant pour en faire disparaître toute trace.

*Recherche de la retassure.* — Si le chutage a été insuffisant, le laminage du lingot a aplati les cavités dont les parois ne se soudent pas. Il y a des trous de retassure dans les pièces (Voir fig. 13, nos 6 et 7).

1° L'étirage des dendrites donne lieu à une texture fibreuse qui après cassure de l'échantillon peut révéler la retassure par comparaison avec la texture cristalline environnante;

2° La retassure étant voisine de la partie intéressée par la ségrégation, on peut rechercher cette dernière par le procédé du papier acidulé qui met en évidence, après application sur la surface à étudier, la localisation du S et du P. Si on trouve une région de ségrégation, l'investigation se portera spécialement dans cette région;

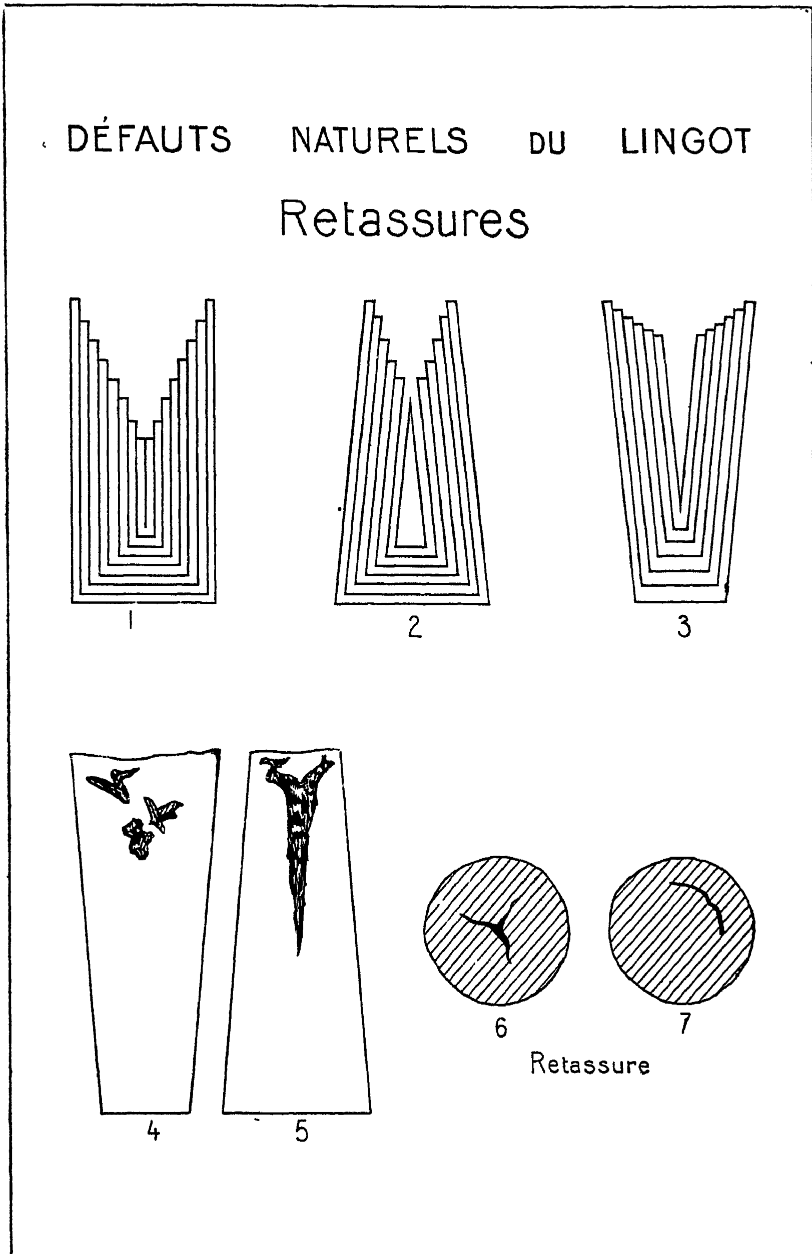



Fig. 13.

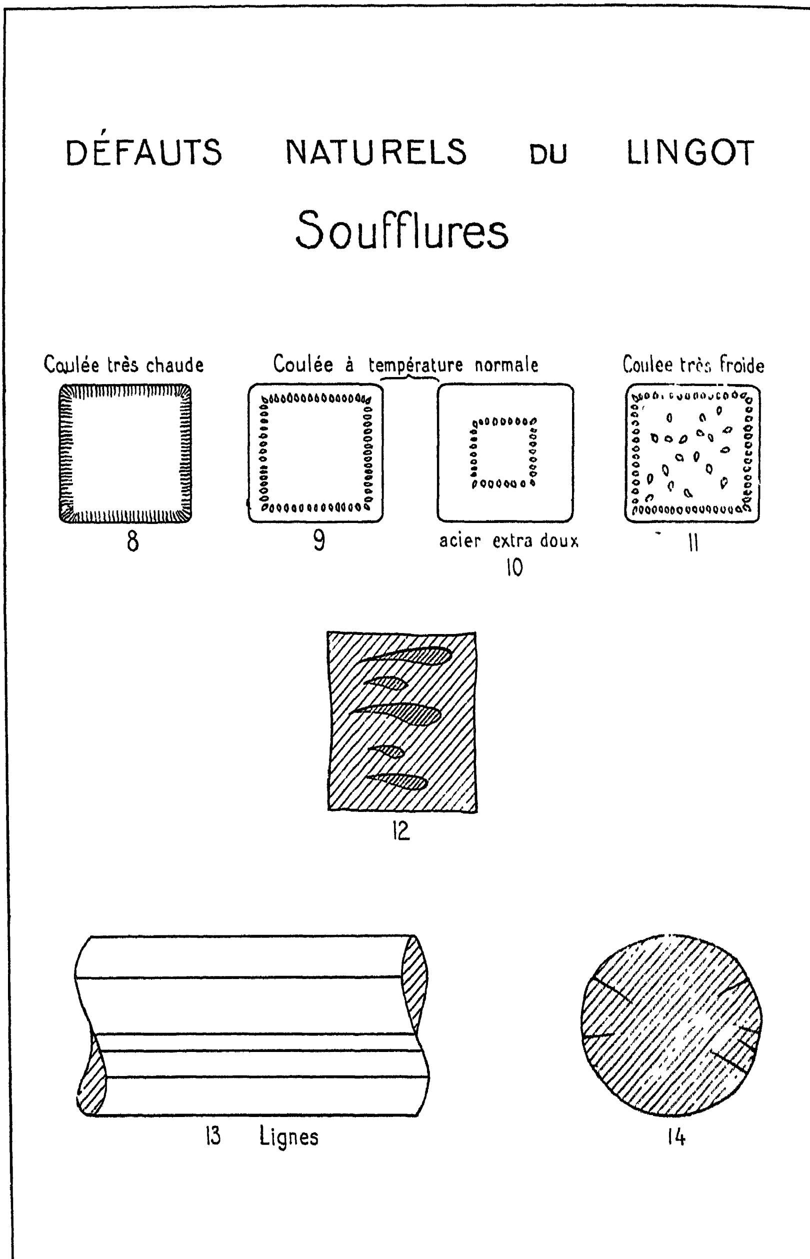

DÉFAUTS NATURELS DU LINGOT
Soufflures
Coulée très chaude
Coulée à température normale
Coulee très froide
8
9
acier extra doux
10
11
12
13 Lignes
14

Fig. 14.

3° Le sablage après pétrolage pourra mettre en évidence une retassure, par exemple dans les bras de vilebrequins découpés en plateau.

*b*) SOUFFLURES. — On nomme ainsi de petites cavités ou poches remplies de gaz (hydrogène et azote), occupant généralement, soit le cœur, soit la zone périphérique du lingot (Voir nos 8, 9, 10 et 11, fig. 14).

Ces gaz ont été surpris par la solidification et n'ont pu se dégager.

La composition de ces gaz est en moyenne, la suivante :

| | |
|---|---|
| H. . . . . . . . | de 70 à 90% |
| Az . . | de 10 à 30% |
| CO . . . . . . | de 0 à 3% |

Les soufflures affectent généralement l'aspect d'ampoules à pointe effilée dirigée orthogonalement à la face du lingot la plus rapprochée (Voir n° 12, fig. 14).

On peut en quelque sorte régler la position des soufflures d'après la température de coulée.

On peut dire que les soufflures se rapprocheront d'autant plus



Fig 15

Cassure d'un acier suivant une « ligne ». La présence de la ligne se reconnaît sur la surface de rupture par l'aspect des parois de la ligne qui diffère du reste de la cassure.

de la surface que le *métal sera plus dur* et que la coulée *sera plus chaude*.

Elles sont diminuées par l'addition de silicium et d'aluminium à la coulée.

*Recherche des soufflures*. — Les soufflures ne disparaissent pas au forgeage.

L'étirage du lingot par forgeage ou laminage les allonge. Les parois latérales se rapprochent *sans se souder*. On a ainsi des *lignes* longues (Voir nos 13 et 14, fig. 14 et fig. 15).

Les soufflures de peau (coulées très chaudes) débouchent à la sur-

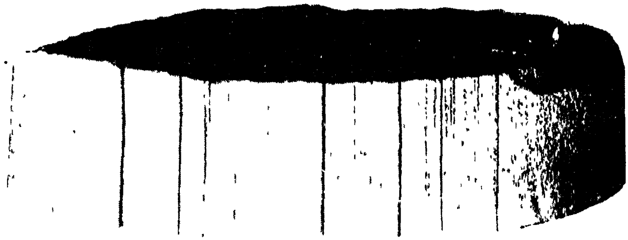


Fig 16

Rondelle tronçonnée dans une barre présentant des lignes et corrodée dans un bain de décapage.

face et les parois s'oxydent; après laminage on a des lignes *superficielles*.

Ces lignes superficielles peuvent être mises en évidence par le décapage (fig. 16).

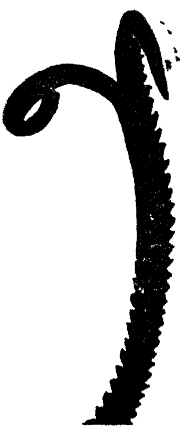


Fig. 17.

Copeau fourchu résultant du burinage d'une ligne qui le divise sur une partie de sa longueur.

Les lignes internes sont révélées à l'usinage de la pièce dont le copeau se brise au tournage (fig. 17).

### 2° *Défauts accidentels.*

*a*) Criques. — Les criques sont des déchirures longitudinales ou transversales de la peau du lingot. Elles proviennent du retrait, qui pendant la première période de refroidissement met l'extérieur en tension et occasionne des ruptures (Voir nos 15 et 16, fig. 18).

Ellles disparaissent par burinage (Voir no 17, fig. 18).

*b*) Tapures. — Les tapures sont des déchirures internes prenant naissance soit lors du refroidissement du lingot, soit lors du réchauffage trop brusque du lingot ou des billettes (Voir les nos 18, 19, 20, 21, fig. 18).

Les tapures sont des défauts très graves.

Les causes prédominantes des tapures sont :

1° Le faible allongement de rupture de l'acier (aciers très carburés par exemple);

2° L'hétérogénéité physique (répartition inégale des masses);

3° L'hétérogénéité chimique;

4° Une conduite thermique défectueuse à l'échauffement et au refroidissement.

Elles se produisent également ultérieurement lors des traitements thermiques des produits transformés, à savoir lors de la trempe en fin de refroidissement, lors du revenu pendant la première période de réchauffage si on n'observe pas les règles de montée de l'échelle thermique.

*Recherche des tapures.* — L'essai au son est très indiqué quand on a un lot de pièces semblables (la durée du son est la caractéristique acoustique de comparaison).

*c*) Gouttes froides. — Elles naissent d'une chute de trop grande hauteur de l'acier liquide dans la lingotière. Le liquide rejaillit alors vers les parois en gouttelettes qui se solidifient rapidement, s'oxydent à la surface et retombent dans la masse.

Elles ne se soudent pas au reste du métal et en général on les trouve près de la surface.

Ajoutons à ces défauts les *incrustations de sable* provenant de l'entraînement du sable de mauvaise qualité garnissant la poche de coulée.

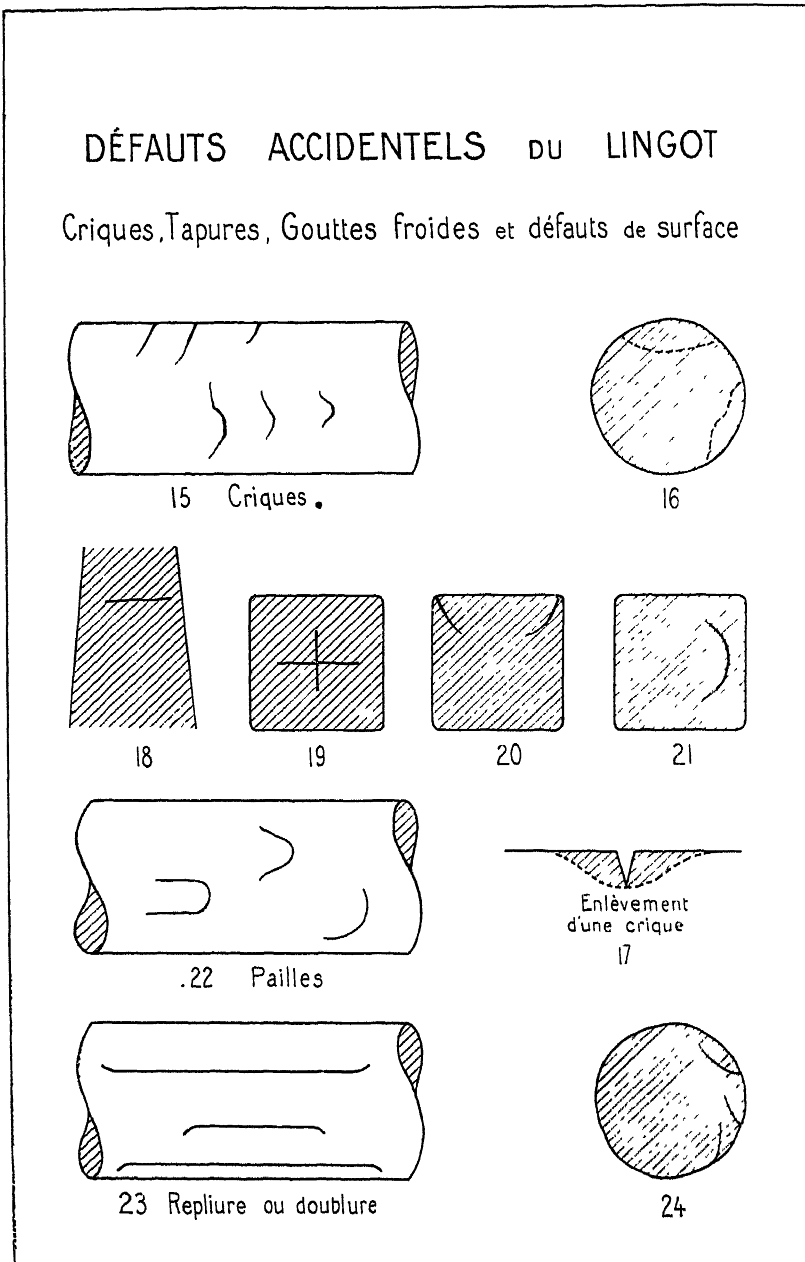

DÉFAUTS ACCIDENTELS DU LINGOT
Criques, Tapures, Gouttes froides et défauts de surface
15 Criques.
16
18
19
20
21
.22 Pailles
Enlèvement d'une crique
17
23 Repliure ou doublure
24

Fig. 18.

Enfin, les *rides* de la peau du lingot provenant de l'ascension par saccades du métal liquide contre les parois de la lingotière (Voir fig. 19).

Ces défauts superficiels par laminage ou forgeage donnent naissance aux *pailles* qu'on enlève par *burinage* (Voir fig. 18, n° 22).

*Acier moulé.* — Au lieu d'être coulé en lingots, l'acier est quel-

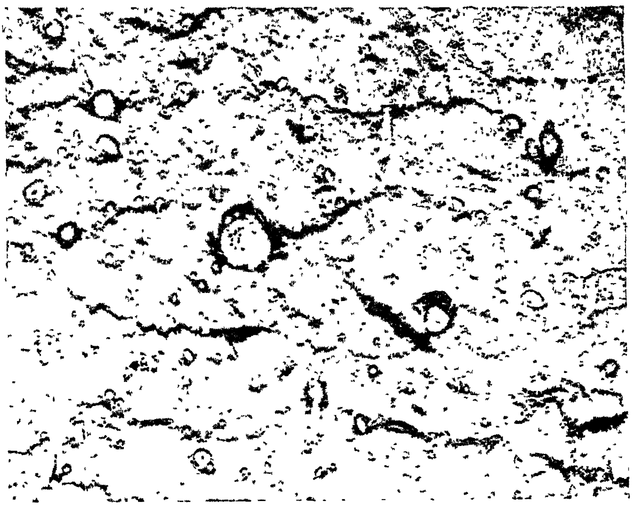


Fig 19.
Gouttes froides et rides sur la surface d'un lingot

quefois versé directement dans des moules donnant la forme de la pièce.

Dans ce moulage, il faut tenir compte du grand retrait de l'acier 1,2 à 3 %. Les aciers moulés sont généralement de nuance douce ou demi-dure.

Le cahier des charges de l'artillerie distingue deux classes d'acier moulé à savoir :

| | | |
|---|---|---|
| 1re classe. . . . . . . . . | R = 45 k | A% = 15 |
| 2e classe. . . . . . . . | R = 55 k | A% = 8 |

Il y a une technique spéciale pour ce moulage d'acier tenant au grand retrait du métal et à l'état pâteux qu'il prend avant de

se solidifier, rendant difficile l'alimentation de la pièce par les masselottes. Celles-ci sont d'ailleurs très importantes et arrivent à peser le même poids que la pièce de moulage.

Les tensions de la pièce moulée sont détruites par un recuit.

La trempe qui amènerait des déformations et peut-être des tapures dues aux tensions n'est pas pratiquée.

Bien entendu, il faut s'attendre à trouver dans les pièces en acier moulé les défauts du lingot, notamment les criques et les soufflures et même des trous provenant de la difficulté d'alimentation par la masselotte.

La résistance des pièces en acier moulé est donc inférieure à celle des aciers forgés et laminés.

En revanche, la fabrication de ces pièces est incontestablement économique.

# CHAPITRE VII

# TRANSFORMATION

## § 1. — Forgeage et laminage.

Les lingots affranchis par chutage de la retassure et par burinage des défauts superficiels sont forgés ou laminés, amenés à l'état de blooms, billettes, barres ou de pièces de forme.

*But du forgeage.* — 1° Améliorer les qualités du métal;
2° Donner approximativement à la pièce la forme désirée.

*Engins employés.* — Marteaux-pilons, presses ou laminoirs.

*Traitements thermiques.* — (Voir vol. I, titre III, chap. XI, p. 200).

*Résultats du travail de forgeage. Corroyage.* — Le forgeage au pilon, à la presse ou au laminoir a pour but d'agir mécaniquement sur la grosse cristallisation due au refroidissement du lingot d'acier; il brise ce réseau de première consolidation.

C'est l'amélioration de la texture primaire que seul il a le pouvoir de réaliser.

Il donne par surcroît les formes désirées à la pièce de forge, travail de façonnage qui produit en même temps le malaxage des cristaux.

Le forgeage *à cœur* consiste à intéresser le centre de la pièce aussi bien que la périphérie à ce travail de pétrissage, de façon que le réseau de ferrite central soit bien disloqué et réparti dans la masse de perlite.

C'est là une technique de forgeage qui a donné naissance à de nombreuses discussions, à savoir :

Avantages respectifs du pilon, de la presse, du laminoir.

Relations entre la puissance de ces engins et la grosseur du lingot.

Quel que soit l'appareil de forgeage choisi, quelle que soit la grosseur primitive du lingot de départ, le travail de forgeage, en dehors de la dislocation des cellules de première consolidation, aboutit généralement à une modification des dimensions.

On arrive ainsi à la notion de *corroyage* de la pièce.

*Coefficient de corroyage.* — Le *coefficient de corroyage* peut être défini d'une façon générale par le *rapport des distances de deux molécules avant et après forgeage* (lieutenant Pouilloux). Un corroyage ainsi défini n'est pas mesurable d'une façon aisée. Aussi, pratiquement, appelle-t-on *coefficient de corroyage* le rapport entre la section droite du lingot initial et celle de la pièce brute de forge.

Si le métal subit un simple étirage, le coefficient de corroyage est également défini par le rapport entre la longueur finale et la longueur initiale.

Coefficient de corroyage = 2 si la longueur du lingot a été doublée.

A-t-on intérêt, dans un but d'amélioration croissante de la qualité du métal, à exiger des coefficients de corroyage très élevés?

Il est bien certain que, pour s'imposer des corroyages considérables nécessitant des suppléments de dépenses par suite de la multiplication des chauffes, il faut trouver comme compensation des améliorations indiscutables.

Or, des expériences récentes de M. Charpy (1), portant sur des pièces soumises à des corroyages variant de 1,7 à 6,1, ont mis en évidence les points suivants :

« On peut considérer comme établi que le corroyage de l'acier ne modifie pas sensiblement la résistance à la traction et l'allongement proportionnel, soit en *long*, soit en *travers ;* par contre, le corroyage améliore la striction, la résistance au choc et la résilience dans le *sens long* et réduit fortement les mêmes grandeurs dans le sens *travers.*

---

(1) Charpy, *Le Corroyage de l'acier, son influence sur les propriétés du métal* (*Revue de Métallurgie*, septembre, octobre 1918).

Lieutenant Pouilloux, de l'Inspection des forges de Lyon et de l'Inspection technique des produits métallurgiques de l'aviation, *Influence sur la qualité de l'acier, procédé de forgeage et du coefficient de corroyage dans la fabrication des canons.*

« L'influence bienfaisante accordée au corroyage repose donc

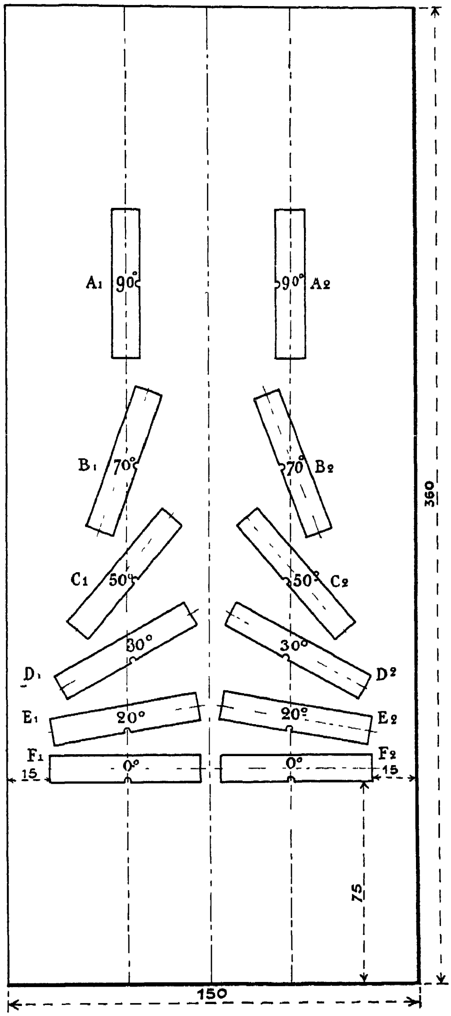



Fig. 20.

uniquement sur ce fait que, dans la plupart des cas, on considère seulement des essais en long.

« Il faudrait, pour savoir dans quel cas le corroyage peut être utile, apprécier l'importance relative des déformations suivant le sens long, le sens travers ou suivant divers azimuts. »

En faisant varier l'orientation des axes des éprouvettes d'essai (traction-résilience) par rapport à la direction générale des fibres du métal, on peut se fixer sur la valeur des caractéristiques du métal en fonction de cette orientation.

C'est ainsi que M. Charpy, dans l'étude précitée, relate l'expérience suivante :

Un lingot d'acier demi-dur avait subi un corroyage de 13. Des éprouvettes de résilience (10 × 10 × 55, entaille Charpy à mi-hauteur) ont été prélevées. L'angle de l'entaille avec la direction du laminage était respectivement :

0° — 20° — 45° — 90°

Les résiliences correspondantes, après trempe et recuit du barreau, furent 1,30, 1,50, 3,40 et 13,50. L'amélioration de la résilience dans la longueur avait donc compromis la valeur de la résilience dans le sens travers.

Nous avons effectué d'autre part les expériences suivantes (1) :

1° *Corroyage de 2.* — Un lingot cylindrique d'acier nickel-chrome (type 32) avait subi un simple corroyage de 2, il avait été trempé à 800° et revenu à 650°. Un plateau parallèle à l'axe avait été découpé au centre de ce lingot.

Dans ce plateau, des éprouvettes de résilience (10 × 10 × 55, entaille Mesnager) avaient été prélevées comme l'indique la figure 20.

L'angle de l'entaille avec la direction du laminage était respectivement :

90° — 70° — 50° — 30° — 20° — 0°

En appelant *n* la résilience en long, c'est-à-dire celle pour laquelle l'angle de l'entaille avec la direction du laminage est 90°, on a eu successivement les résultats suivants :

*n*
0,9 *n*
0,7 *n*
0,6 *n*
0,5 *n*
0,6 *n*

---

(1) Lieutenant-Colonel d'artillerie Grard. *L'acier*, 19.9, Berger-Levrault, éditeurs.

La résilience dans le travers complet était sensiblement réduite de moitié.

2° *Corroyage de 8.* — Un autre lingot nickel-chrome (type 32) avait subi un corroyage de 8.

Dans les mêmes conditions d'expérience et pour les mêmes angles de l'entaille avec la direction du laminage, on a respectivement les résultats suivants :

$n$
0,9 $n$
0,6 $n$
0,4 $n$
0,3 $n$
0,2 $n$

La résilience dans le travers était réduite au cinquième de la résilience en long.

Dans les deux cas, la valeur de $n$ était sensiblement de 12 kilogrammètres. Les résiliences dans le travers varient donc en sens inverse de la valeur du corroyage.

C'est donc l'étude des sollicitations auxquelles sera soumise la pièce qui doit donner les directives sur la manière d'orienter le corroyage.

C'est ce qu'exprime M. Charpy dans les conclusions de son étude :

« Le constructeur, qui sait comment il a voulu faire travaille la pièce qu'il a dessinée, doit traduire sa conception en déterminant les régions dans lesquelles seront prélevés des barreaux répondant à des conditions déterminées.

« Ces barreaux devront être pris dans diverses directions, si cela correspond au travail de la pièce; le métallurgiste doit, pour réaliser les conditions ainsi fixées, choisir, dans chaque cas, le type de lingot à employer et la nature des déformations à lui faire subir. »

En résumé, le corroyage est incontestablement nécessaire, puisqu'il a un rôle indispensable à remplir. Il n'y a pas d'intérêt, il peut même être nuisible, de chercher à lui donner une trop grande valeur.

En tous cas, un coefficient de corroyage de 2 semble généralement suffisant, s'il est combiné avec une bonne orientation de forgeage.

*Avantage des petits lingots.* — De plus, ce coefficient relativement faible permet de partir d'un petit lingot, c'est-à-dire d'un lingot qui semble le point de départ d'une fabrication de choix.

Le lingot de *dimension minimum* pour la pièce de forge recherchée est celui qui possède la cristallisation la moins grossière au centre, étant donné que son refroidissement a été plus rapide que celui d'un gros lingot. Il a d'ailleurs été constaté qu'un lingot peu volumineux (750 kg par exemple) contient aussi peu que possible de scories et défauts divers qu'on rencontre inévitablement dans un lingot de plusieurs tonnes.

D'ailleurs, il faut bien noter qu'une faible section de lingot est avantageuse.

A poids égal, il y a intérêt à fabriquer un lingot aussi long que possible, quitte à aplatir ce dernier par forgeage, ce qui lui donne des propriétés appréciables dans le sens *travers* et réalise une isotropie qui peut être avantageuse.

La recherche d'un corroyage supérieur destiné à détruire plus complètement le réseau de première solidification conduisant à l'emploi d'un lingot à cristallisation plus grossière, ne semble donc pas, pour toutes ces raisons, un processus recommandable.

Ajoutons que le pétrissage moléculaire du lingot initial peut s'exercer, suivant le résultat cherché, dans plusieurs directions, si une certaine isotropie est désirable.

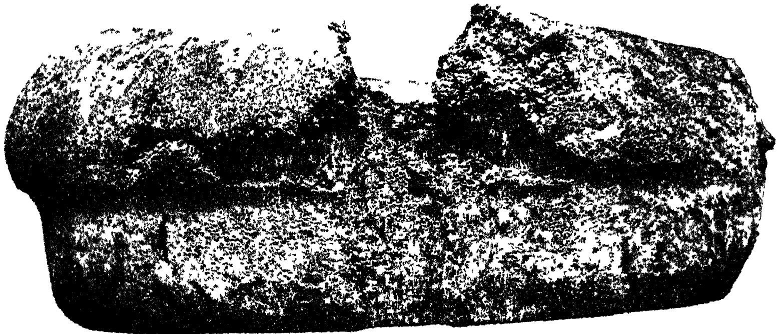
En tout cas, il est bon de noter qu'une liaison entre le producteur et le constructeur ou l'inventeur est très utile pour donner à la pièce de forge les qualités originelles qui assureront son avenir.

### Défauts de la pièce forgée.

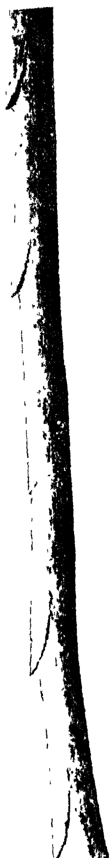
En dehors des trous de *retassure*, des *lignes de soufflure* (superficielles ou profondes), des *pailles* provenant des défauts de surface des lingots, signalés au titre précédent, qui affectent le produit transformé, les défauts suivants sont à signaler sur la pièce forgée :

*a*) Crique ou déchirure de forge. — Le forgeage allonge, à une température déterminée, certaines régions de la pièce.

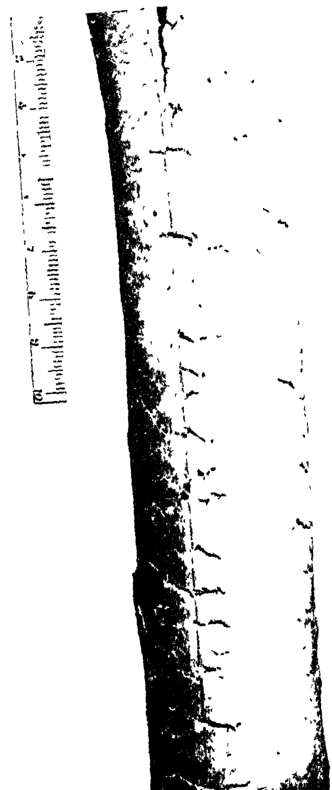
Si l'allongement imposé est supérieur à l'allongement maximum



1. — Déchirure de forge dans un acier brûlé.
On voit le grain grossier du métal dans la déchirure



2. — Criques de forgeage sur une barre.



3. — Hauban fuselé dont les criques de laminage (métal rouverain) se sont ouvertes lors de l'aplatissement par laminage à froid.

PLANCHE I

correspondant à la température du métal, il y a une rupture ou déchirure. *C'est la crique de forgeage.*

Lorsqu'on forge à température très élevée, au voisinage du point de fusion, l'acier est à gros grains et sans allongement et les criques sont facilitées. Il y a rupture et oxydation des grains. La déchirure est perpendiculaire au sens de l'allongement de forge (Voir nos 1, 2 et 3 de la pl. I, page 67).

En somme, la crique de forgeage naît d'une exagération dans la température de forgeage ou dans le travail imposé localement à une température quelconque (emploi d'un instrument de forgeage trop puissant), ces causes étant séparées ou réunies.

Elle provient également de la présence exagérée de soufre dans les aciers (aciers *rouverains*), ou du travail à une température de déformation *critique.*

*b*) Repliure ou brulure. — Résulte souvent d'un burinage mal fait ou d'une pinçure entre cylindres (nos 23 et 24, fig. 18).

Il se produit une saillie qui est repliée sur la masse du métal et s'y enfonce.

C'est un défaut longitudinal pénétrant *obliquement* dans le métal.

## § 2. — Matriçage et Estampage.

Le matriçage et l'estampage constituent souvent le deuxième stade du forgeage.

Ces modes opératoires s'imposent pour l'aviation, au double point de vue de la qualité du *produit obtenu* et de *l'économie de métal.*

On emploie souvent indifféremment les mots « matriçage » et « estampage ».

La définition qui semble prévaloir est la suivante :

L'estampage signifie le « travail au mouton ».

Le matriçage signifie le « travail au pilon ou à la presse en utilisant les matrices ».

*Ébauche.* — Dans la plupart des cas il est utile de préparer le métal par un forgeage préalable, de façon à lui permettre d'épouser plus aisément la forme de la matrice.

La suite des opérations est donc généralement la suivante :

*Petites pièces.* — Estampage sur barres s'il s'agit de pièces de dimensions très réduites,

ou ébauchage au mouton (pièces d'armes).

Après cet ébauchage, premier estampage à température élevée suivi d'ébavurage et souvent d'une seconde chauffe à température plus basse pour obtenir plus de rigueur dans les cotes.

A la suite de cette chauffe, deuxième estampage.

*Grosses pièces.* — Ébauchage soit au gros pilon, soit au gros mouton à dégorger ou avec matrice ébaucheuse, suivi de 1 ou 2 estampages au mouton.

En général l'ébauchage est réservé au pilon et l'estampage au mouton.

*Emploi de la presse.* — La presse a une action progressive ne compromettant pas l'action de la matrice. Elle transmet mieux que le mouton la pression au cœur du métal. Elle assure le corroyage plus à cœur.

Nusbaumer (1) a travaillé au mouton de 500 kg de l'acier doux jusqu'à une température suffisamment basse pour qu'il n'y ait plus d'écrasement et à la presse hydraulique dans les mêmes conditions de température finale.

Les résultats sont les suivants :

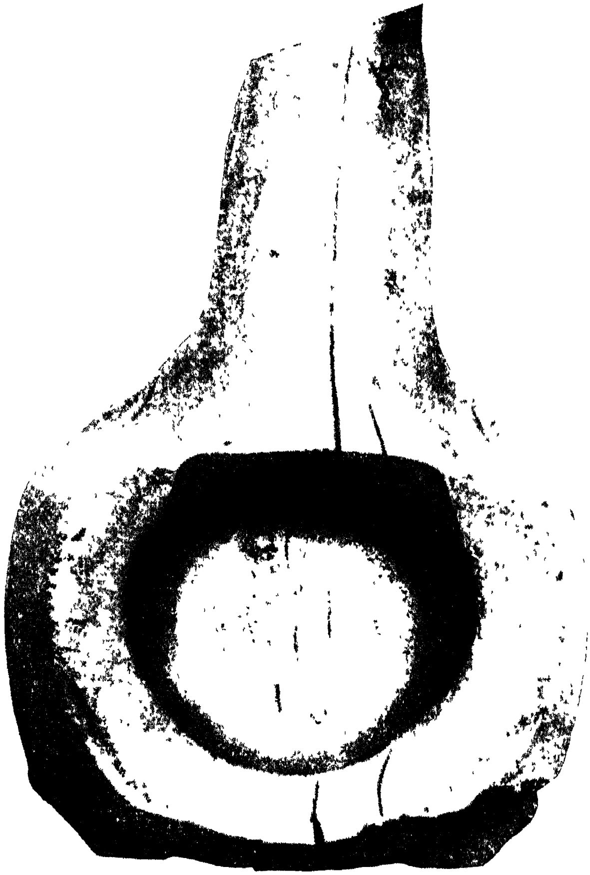
| | |
|---|---|
| *Bloc estampé.* | |
| Dureté superficielle | 125 |
| Dureté au centre | 95 |
| *Bloc travaillé à la presse.* | |
| Dureté superficielle | 152 |
| Dureté au centre | 152 |

## Défauts des pièces matricées ou estampées.

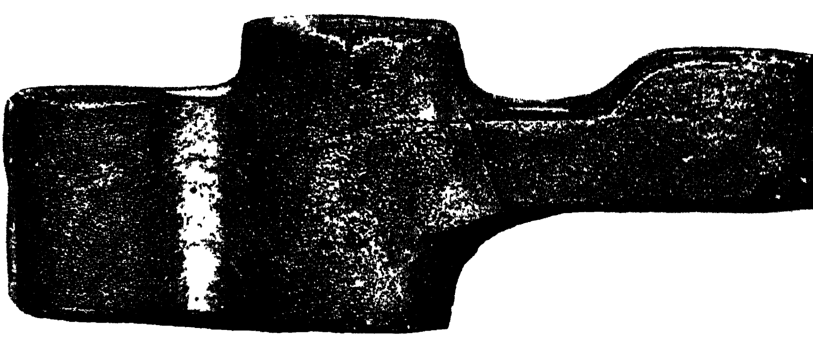
Il faut au préalable s'assurer que le lopin est exempt de tous les défauts dus au lingot ou au forgeage. Ces défauts ne font que s'accentuer par matriçage (Voir pl. II, n° 4, page 70).

---

(1) Voir *Estampage et son état actuel en Angleterre et sur le continent*, NUSBAUMER (*Revue de Métallurgie*, mars 1914).



4 — Tête de bielle brute de forge
présentant des lignes ouvertes par le forgeage



5. — Culbuteur présentant une repliure ou reprise au matriçage
par suite d'une mauvaise conception de l'ébauchage de forge.

PLANCHE II

*Moyens de s'assurer du défaut du lopin.* — 1° Sablage après pétrolage.

Cet essai mettra en évidence les défauts physiques superficiels.

2° Refoulement à chaud du lopin suivant l'axe de la barre, de façon à obtenir une réduction de longueur de 20 à 25 %.

Les défauts longitudinaux et obliques s'ouvrent, s'exagèrent (Voir pl. III, n° 6, p. 72).

Ils doivent être éliminés par burinage ou meulage (Voir pl. IV, n° 9, p. 73, l'exemple d'un burinage incomplet).

*Défauts inhérents au matriçage.* — L'estampage ou matriçage, en dehors des criques ou déchirures de forge naissant d'une exagération du travail, peut produire des *repliures* ou *reprises*.

Ces défauts se produisent lorsqu'une partie de métal superficiel mise en saillie au cours du travail se trouve réappliquée sur le métal chaud, dans lequel elle s'incruste (Voir pl. II, n° 5 et IV, n° 8).

Ils se produisent encore lorsque les lèvres d'un pli de métal sont mises en contact.

Le n° 7 de la planche III montre des reprises résultant du déréglage de la matrice qui sont entraînées dans la bavure par la matière plastique qui file dans le joint.

## Exemples d'application du matriçage et de l'estampage pour des pièces de moteur d'aviation.

1° Bielle de moteur fixe d'aviation. — (Voir nos 1 à 10 de la figure 21).

a) *Visite et sélection des lopins.*

N° 1. — Lopin. Poids, 9,800 kg.

N° 2. — Lopin refoulé de façon à déceler les criques. Rebut des lopins présentant des criques profondes.

N° 3. — Lopin dont on a meulé les criques peu profondes.

*b) Préparation par forgeage du lopin à l'estampage.*

Nos 4, 5, 6, 7 et 8. — Opérations successives de forgeage constituant l'ébauchage.

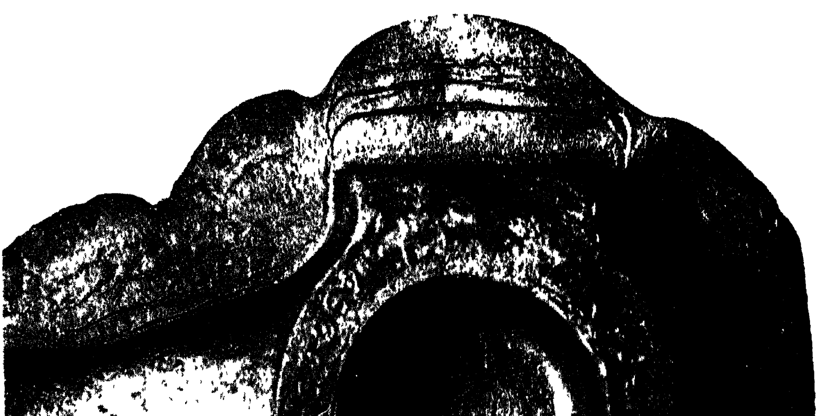
c) *Estampage.*

N° 9. — Pièce avec bavure.

N° 10. — Pièce ébavurée. Poids, 7,880 kg.

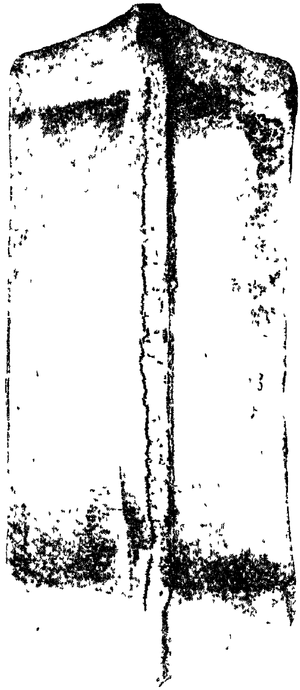


6. — Défauts d'un lopin (pailles et lignes)
mis en évidence par aplatissement préalable à la forge

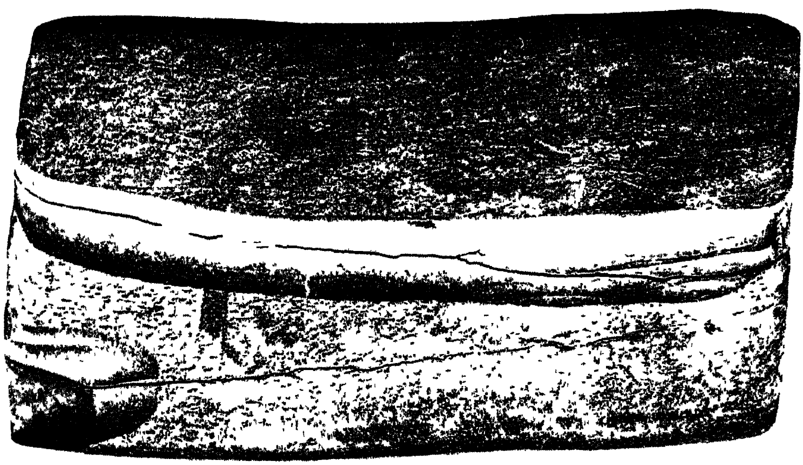


7. — Demi-tête de bielle
montrant sur la bavure l'écoulement du métal par vagues successives à chaque coup de mouton.

Planche III



8. — Bielle de moteur rotatif présentant une fissure résultant d'une repliure au joint de la matrice



9. — Défauts incomplètement burinés d'un lopin (lignes) révélés par aplatissement préalable à la forge.

PLANCHE IV

## Bielle jumelée du Moteur fixe d'Aviation

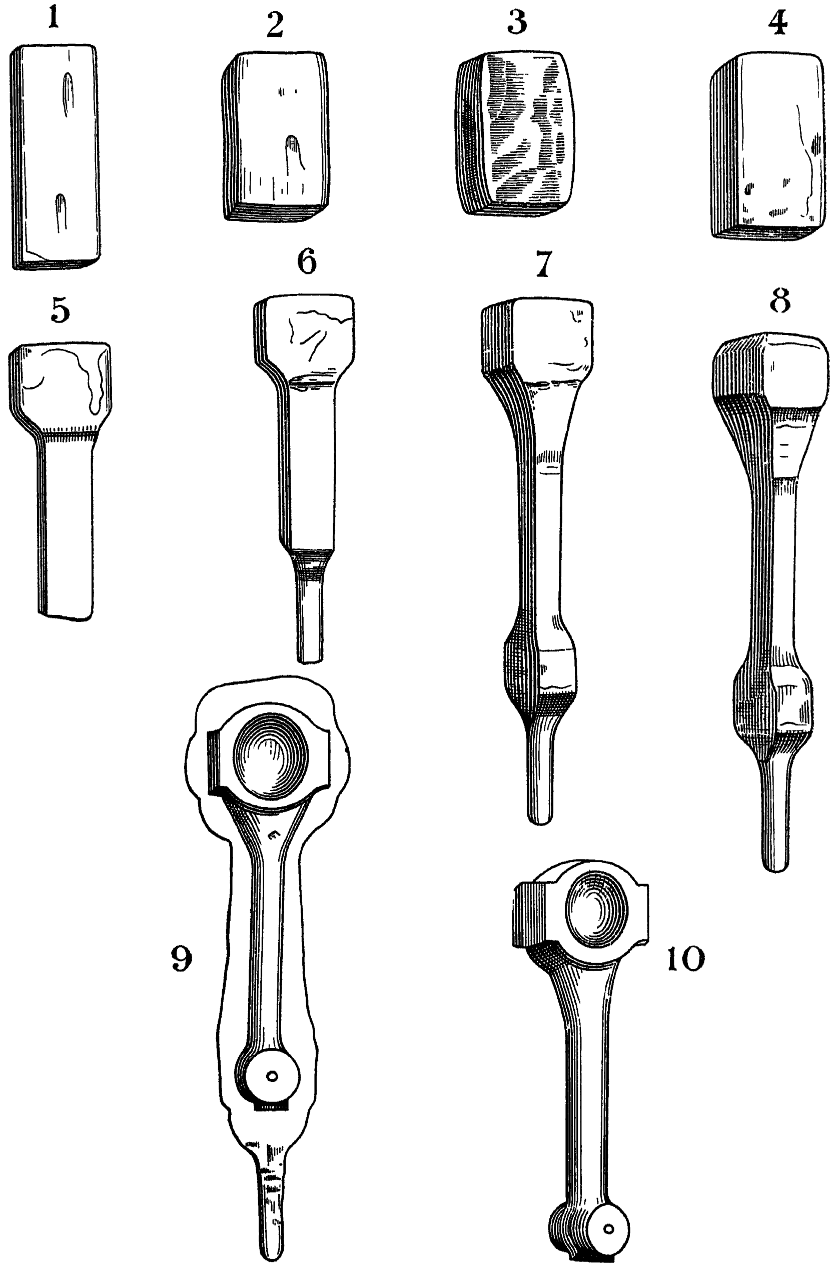



Fig. 21.

# Bielle du moteur rotatif d'Aviation

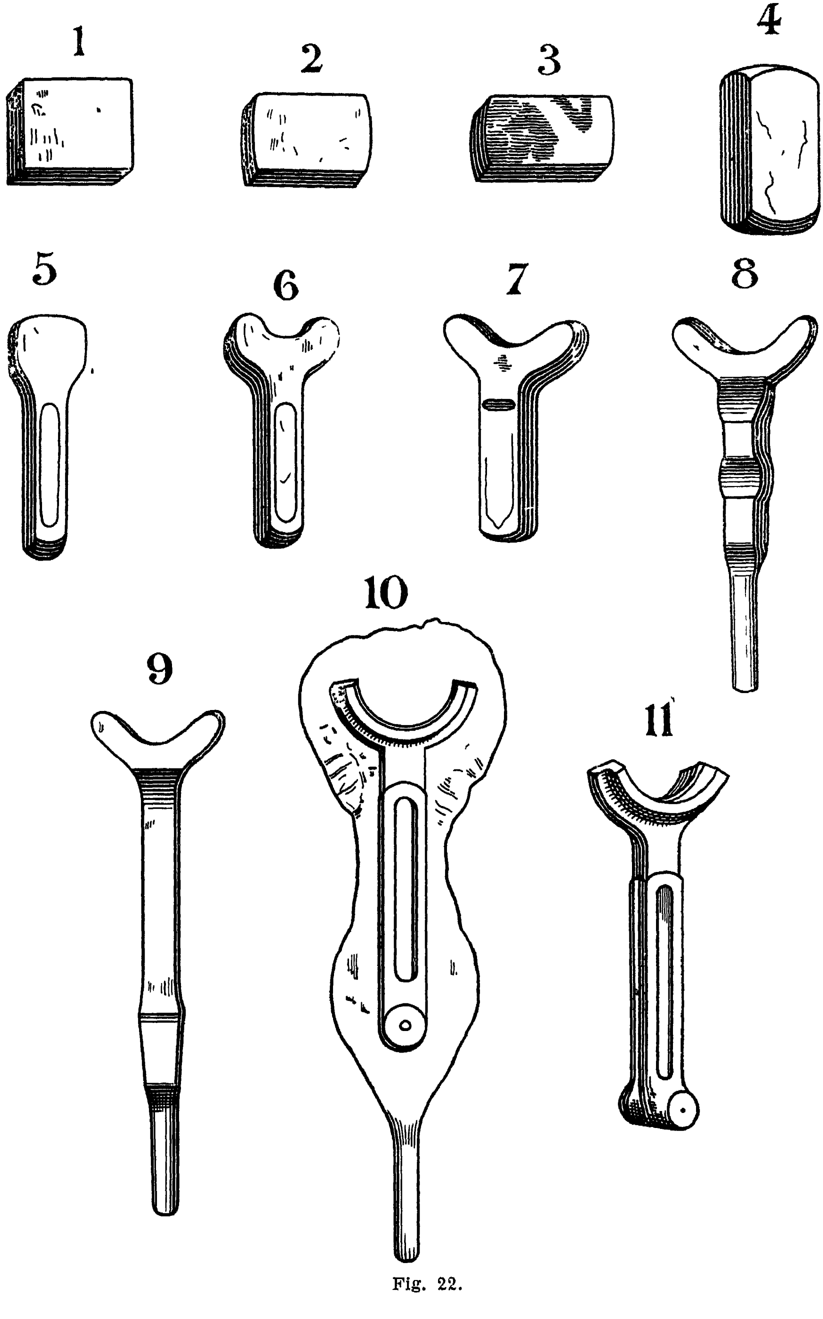



Fig. 22.

# Pignon double de commande de pompe,
# Moteur fixe d'Aviation

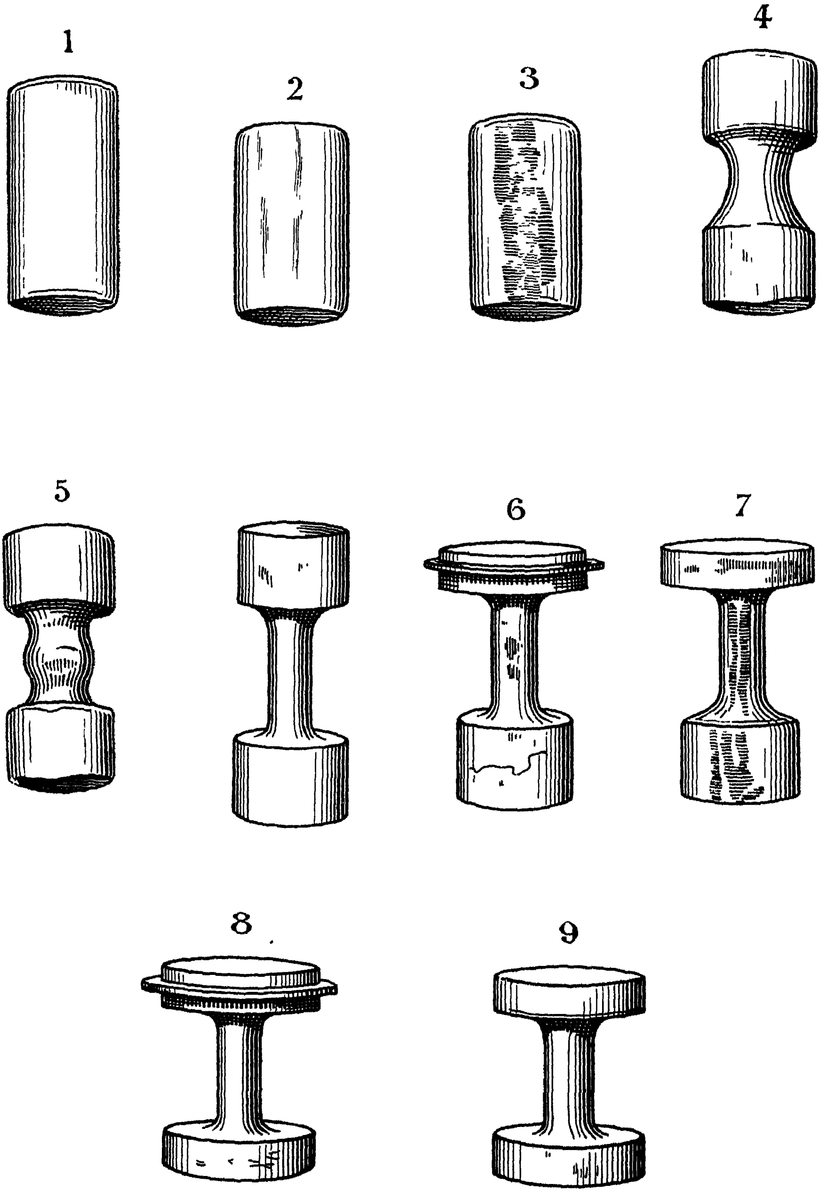



Fig. 23.

2° Bielle de moteur rotatif d'aviation. — (Voir nos 1 à 11 de la fig. 22).

a) *Visite et sélection des lopins.*

N° 1. — Lopin. Poids, 2,900 kg.

N° 2. — Bout refoulé de façon à déceler les criques.

Rebut des lopins présentant des criques peu profondes.

N° 3. — Lopin dont on a meulé les criques peu profondes.

b) *Préparation par forgeage du lopin à l'estampage.*

Nos 4, 5, 6, 7, 8 et 9. — Opérations successives de forgeage constituant l'ébauchage.

c) *Estampage.*

N° 10. — Pièce avec bavure.

N° 11. — Pièce ébavurée. Poids, 1,875 kg.

3° Pignon double de commande de pompe de moteur d'aviation. — (Voir nos 1 à 9 de la fig. 23).

a) *Visite et sélection des lopins.*

N° 1. — Lopin. Poids, 3,600 kg.

N° 2. — Bout refoulé de façon à déceler les criques.

Rebut des lopins présentant des criques profondes.

N° 3. — Lopins dont on a meulé les criques peu profondes.

b) *Préparation par forgeage du lopin à l'estampage.*

Nos 4, 5 et 5 *bis*. — Opérations successives de forgeage constituant l'ébauchage.

c) *Estampage.*

Nos 6 et 7. — Premier estampage.

N° 8. — Deuxième estampage.

N° 9. — Pièces ébavurées. Poids, 3,300 kg.

On pourrait multiplier les exemlpes.

Un autre sera donné au titre XI relatif aux vilebrequins d'aviation.

## Avantages du matriçage et de l'estampage.

Lorsqu'un lopin débarrassé de ses défauts est bien préparé par un travail préparatoire de forgeage à l'estampage ou aux estam-

pages successifs, on obtient une pièce présentant les avantages suivants :

1° Pas de rupture des fibres créées par le laminage du bloom, de la billette ou de la barre, rupture à laquelle tout découpage mécanique dans les demi-produits initiaux donne fatalement naissance.

Voir figures 24 et 25, étude macrographique d'une section de soupape estampée.

Comme autre exemple, voir titre XI, pages 231 et 232, figures 1,

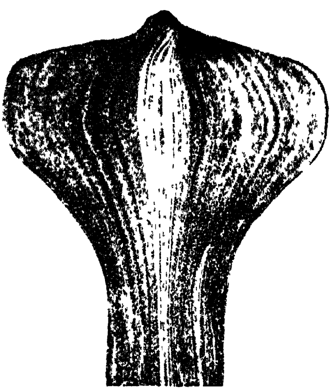


Fig. 24.

Première phase de forgeage d'une soupape.

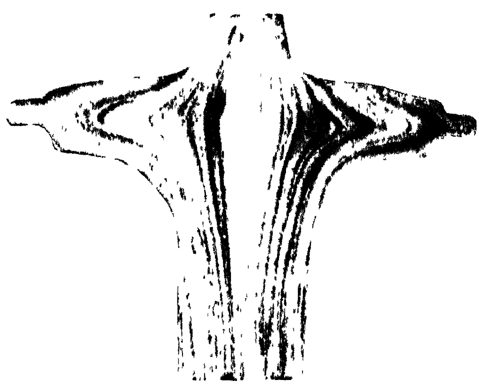


Fig. 25.

Deuxième phase de forgeage d'une soupape

2, 3 et 4, étude macrographique d'une section d'élément de vilebrequin d'aviation matricé et d'un vilebrequin fabriqué par découpage en plateau.

Ces ruptures de fibres amènent généralement des cassures.

De nombreux accidents de ce genre ont malheureusement vérifié cette assertion.

Donc, au point de vue *qualitatif*, l'estampage ou matriçage présente un intérêt primordial.

2° L'économie de métal résultant du matriçage est souvent très considérable.

L'économie de 100 % est de l'ordre courant.

Elle est très fréquemment dépassée.

Donc, au point de vue *quantitatif*, le matriçage s'impose.

### Inconvénients du matriçage et de l'estampage.

La conservation de l'outillage conduit fréquemment à surchauffer les pièces de façon à rendre le métal plus malléable.

La recherche du précis des cotes conduit d'autre part à matricer et estamper à température assez basse et en conséquence à écrouir les pièces plus ou moins fortement.

*Surchauffe et écrouissage* sont des conséquences de ce mode de travail.

Nous verrons au titre VIII, chapitre XV (Perturbations. Causes. Remèdes) les moyens à employer pour parer à ces défauts.

# TITRE VI

# DIAGRAMMES D'ÉQUILIBRE

## CHAPITRE VIII

## DIAGRAMMES D'ÉQUILIBRE DES ALLIAGES FER — CARBONE

L'acier est un alliage de fer et de carbone.

Prenons une gamme d'échantillons d'aciers dont la teneur en carbone va en décroissant.

Chauffons ces échantillons vers 950° et observons les refroidissements avec un galvanomètre.

Traçons la courbe de refroidissement, portant en ordonnées les températures T et en abscisses les temps $t$.

Nous remarquons les paliers $A_3$, $A_2$, $A_1$ (fig. 26).

Ce sont les points critiques de Tchernoff ou points de transformation.

Si on trace les points critiques à l'échauffement, nous observons les mêmes points critiques à une température légèrement plus élevée. Les points critiques apparaissent donc, à la montée comme à la descente, avec un certain retard. C'est le phénomène *d'hystérésis.*

*Diagramme de Roozeboom* (Diagramme total (fig. 27), partie inférieure du diagramme (fig. 28). — Si nous plaçons les points critiques au refroidissement de l'acier à l'état solide sur un même diagramme, en prenant comme abscisses les teneurs en carbone

et comme ordonnées les températures, nous avons le diagramme de Roozeboom (partie inférieure, fig. 28),

AB est le lieu des points $A_3$
DB est le lieu des points $A_2$
BC est le lieu des points $A_3$, $A_2$

L'horizontale du point C est le lieu des points $A_1$ des aciers à

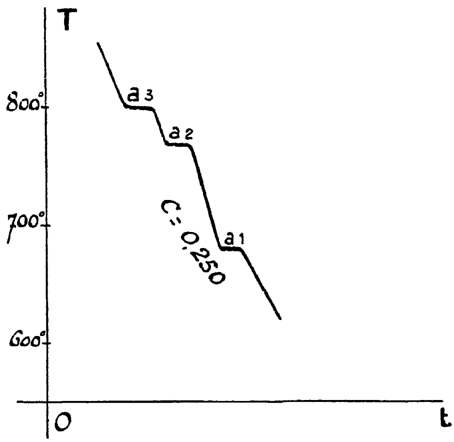



Fig 26.

teneur en carbone inférieure à celle donnée par l'abscisse du point C qui est le point eutectoïde.

Ces lignes de transformation se réfèrent donc aux aciers hypo-eutectoides.

Le point C correspond à :

$$t = 680^\circ$$
$$C = 0,850\%$$

C'est l'unique point de transformation des aciers eutectoïdes.

Le point B correspond à :

$$t = 750^\circ$$
$$C = 0,35\%$$

Les lignes de transformation des aciers hypereutectoïdes sont

constituées par la ligne C G, lieu des points $A_3$ et l'horizontale du point C.

*États allotropiques du fer.* — Il y a trois états dits :

fer $\alpha$, fer $\beta$, fer $\gamma$ (1)

Ils se différencient comme suit :
1° Fer $\alpha$, magnétique, ne dissout pas le carbone;
2° Fer $\beta$, non magnétique, ne dissout pas le carbone,
3° Fer $\gamma$, non magnétique, dissout le carbone.
Les aciers contiennent le fer à l'état $\alpha$, $\beta$ et $\gamma$.

de 0° à $A_2$, on a le fer $\alpha$,
de $A_2$ à $A_3$, on a le fer $\beta$,
Au-dessus de $A_3$, on a le fer $\gamma$.

A l'échauffement, $A_3$ correspond au passage du fer de l'état $\beta$ à l'état $\gamma$.

$A_2$ correspond à la disparition du magnétisme.

*Recalescence.* — Quant à $A_1$, il correspond au phénomène de la *recalescence*, qui a une importance capitale dans le traitement des aciers.

Au refroidissement, c'est à la température du point $A_1$ que le fer et le carbone se combinent pour former un carbure de fer :

$Fe^3C$ = cémentite

A l'échauffement, c'est à la température du point $A_1$ que commence la dissociation de la cémentite en fer et en carbone, cette dissociation produisant le fer $\gamma$ qui permet une première dissolution du carbone dans le fer $\gamma$ ainsi libéré.

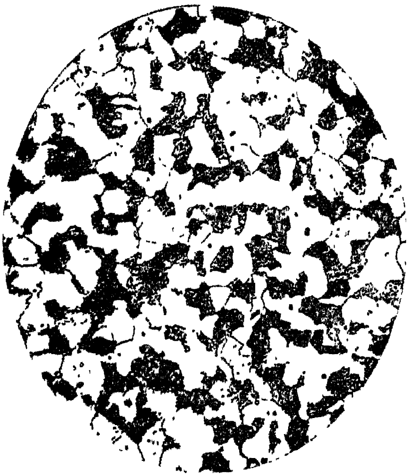
La cémentite forme avec le fer $\alpha$ (ferrite) un *eutectoïde*, la *perlite.*

De 0 à 0,850 de carbone, l'acier est composé de *ferrite + perlite.*

A 0,850 de carbone, il a la composition eutectoïde perlite.

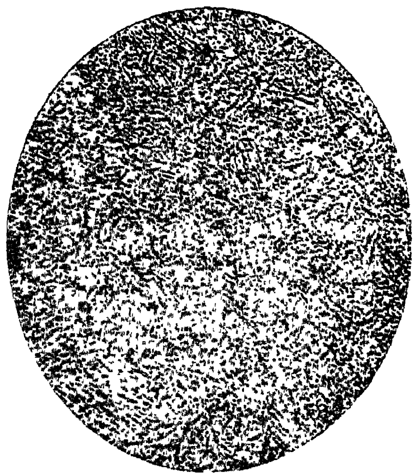
(1) On distingue également, à la suite de recherches récentes, le fer , stable au-dessus de 1.400° et dans lequel le magnétisme réapparaît bien que ce fer dissolve toujours le carbone.

# CONSTITUANTS DES ACIERS AU CARBONE



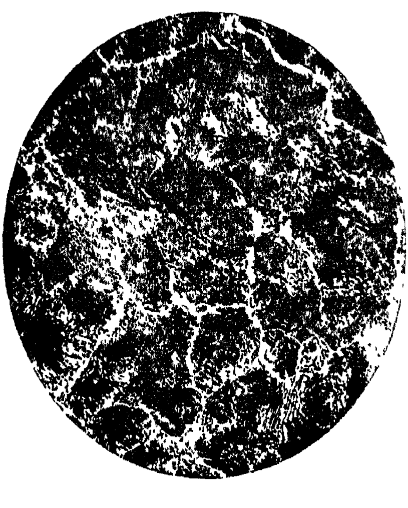
1

Acier hypoeutectoïde
Ferrite et Perlite



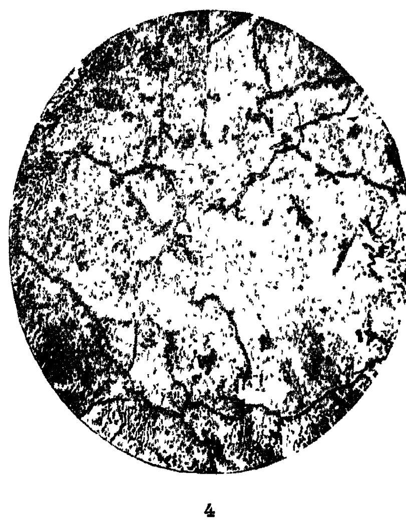
2

Martensite



3

Acier hypereutectoïde.
Attaque à l'acide picrique.



4

Acier hypereutectoïde.
Attaque au picrate de soude.
Cémentite colorée en noir.

Planche V

Au-dessus de 0,850 de carbone, on a la composition *perlite* + *cémentite*.

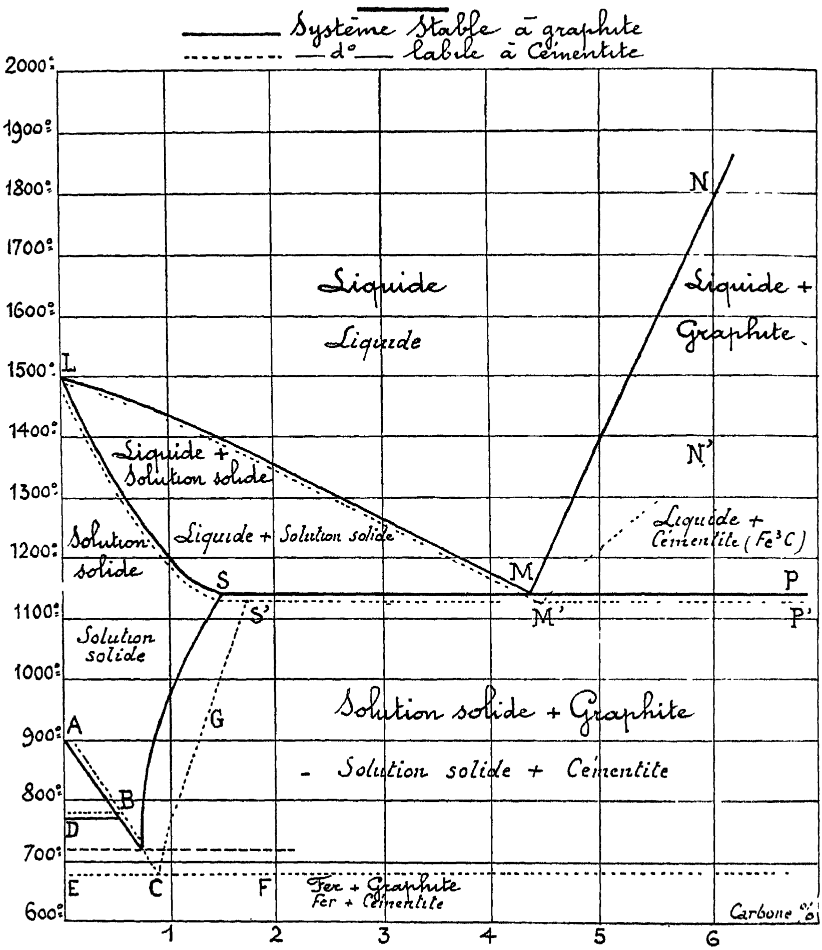



Fig. 27.

Diagramme de Roozeboom des alliages fer-carbone.

Les aciers de 0 à 0,850 de carbone sont dits aciers *hypoeutectoïdes.*

Les aciers renfermant 0,850 de carbone sont dits aciers *eutectoïdes.*

# ACIERS AU CARBONE

## DIAGRAMME DE ROOZEBOOM

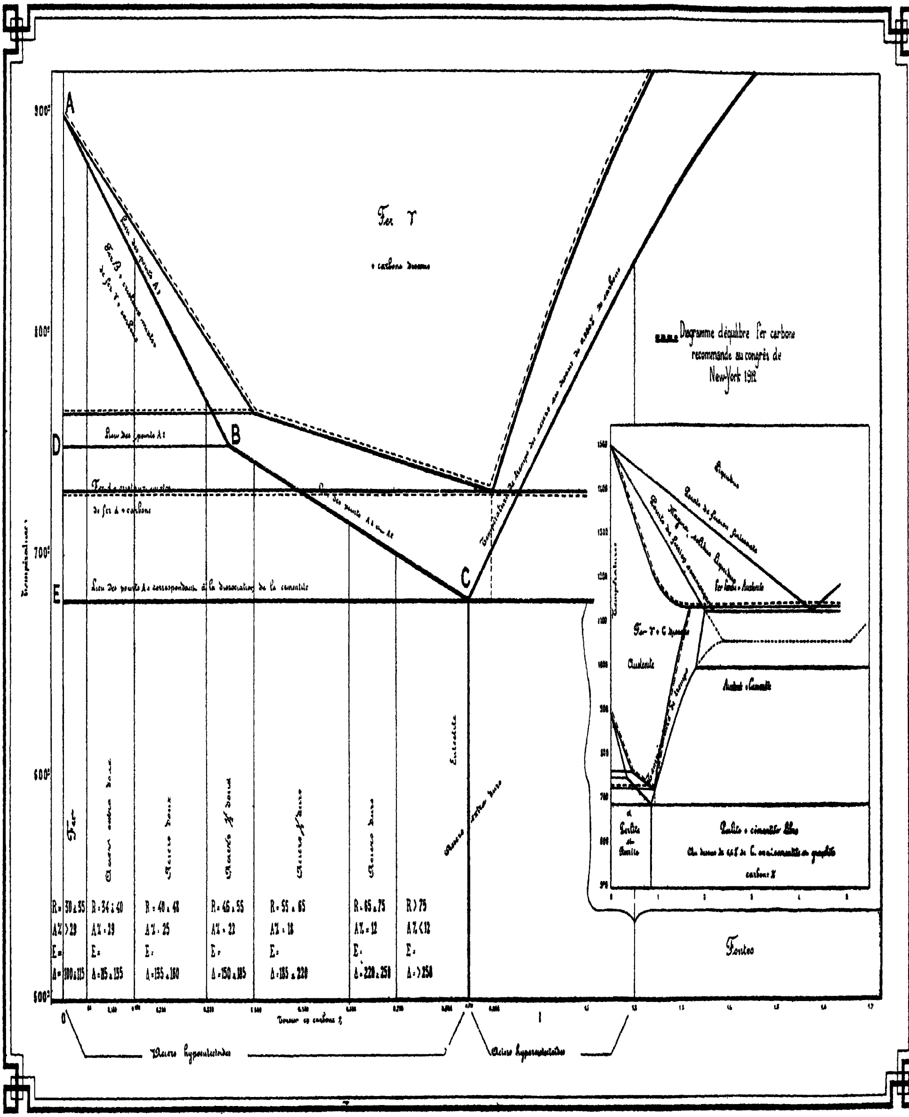



**Fig. 28.**

**Partie inférieure du diagramme de Roozeboom.**

Les aciers renfermant plus de 0,850 de carbone sont dits aciers *hyporeutectoïdes.*

Quand la teneur en carbone augmente, les fontes font leur apparition.

Le système *cémentite perlite* des fontes blanches fait place au système *graphitique* des fontes grises.

*Aciers spéciaux.* — Les points critiques des aciers spéciaux donnent lieu, pour chacun de ces aciers, à une étude particulière.

*Application de la loi des phases aux alliages fer-carbone.*

Si on reprend la loi de Gibbs

$$V = n + p - \varphi$$

pour les aciers, nous avons :

$n = 2$, à savoir : fer pur et carbure de fer,

$p = 1$, température, la pression ne subissant pas de variation,

$$n + p = 3$$

Quant au nombre de phases $\varphi$, on peut les ramener à 3 :

Phase *ferrite* ou phase $\alpha$,

Phase *cémentite*,

Phase *austénite* ou solution solide des deux premières ou phase $\gamma$.

Ceci étant donné, considérons le diagramme de Roozeboom et cherchons le nombre de variances dans les différents systèmes pour le diagramme d'équilibre fer-cémentite. à l'exclusion du diagramme fer-graphite.

1° Le point figuratif de l'acier est au-dessus de la ligne de transformation A B C G.

Une seule phase : la phase solution solide (*austénite*).

$$V = 2 \text{ — système bivariant}$$

Les deux caractéristiques indépendantes sont :

la *température*,

la *composition* de l'acier, dont la connaissance fixe le point figuratif.

2° Le point figuratif est dans la région A B C E.

Deux phases, à savoir :

La phase ferrite (partie du fer qui s'est dégagée au refroidissement de la solution solide), et la phase solution solide saturée de fer, dont la teneur en carbone dépend de l'ordonnée du point figuratif entre la ligne lieu de $A_3$ et la ligne lieu de $A_1$.

L'abscisse du point de la courbe des points $A_3$ correspondant à cette ordonnée indique cette teneur :

$$V = 3 - 2 = 1 \text{ système monovariant}$$

Une seule caractéristique le définit : la *température*.

3° Le point figuratif de l'acier est dans la région G C F.

Deux phases, à savoir :

Solution solide $\gamma$ et cémentite.

$$V = 3 - 2 = 1 \text{ système monovariant}$$

4° Le point figuratif est au-dessus de E C F.

Deux phases à savoir :

Phase ferrite et phase cémentite (l'eutectique-perlite étant un agrégat de ferrite et de cémentite).

$$V = 3 - 2 = 1 \text{ système monovariant}$$

Une seule caractéristique le définit : la température.

Le diagramme que nous avons discuté, suppose une teneur en carbone inférieure à 4,60.

Quand la teneur est plus forte, il se forme du graphite.

*Remarques.* — L'équilibre fer-carbure de fer est un équilibre *labile* ou *métastable*.

L'équilibre *stable* des alliages fer-carbone est représenté par le diagramme fer-graphite.

Ces deux diagrammes sont partiellement superposables.

Les lignes du diagramme stable sont au-dessus des lignes correspondantes de l'autre.

En raison des résistance passives, et en dehors des fontes grises, l'équilibre labile à cémentite est le seul à considérer.

Pour les aciers, proprement dits, le système fer-cémentite reste stable dans les limites de température entre lesquelles s'effectue le traitement d'un acier.

*Diagramme de Roozeboom* (partie supérieure). — *Équilibre stable à graphite.* — La partie inférieure du diagramme est indispensable pour comprendre le traitement des aciers.

Le diagramme est utile à compléter pour bien comprendre les perturbations thermiques (brûlures).

Si, dépassant les limites de température utilisées pour le traitement de l'acier, nous allons jusqu'à la fusion, nous trouvons un liquidus composé de deux branches :

L M et M N

Au-dessus de L M N, on a un liquide homogène ayant la composition de l'acier.

Au-dessous de L M, il y a séparation, à partir du liquide, d'une solution solide, fer-carbone dont la teneur en carbone varie de 0 à 1,4 % C (point S du diagramme).

M N marque la séparation du graphite (équilibre stable).

L M et M N se coupent en M, point eutectique.

En ce point, le liquide à 4,3 % de carbone se solidifie, formant un eutectique graphite-solution solide à 1,4 % de carbone.

Le solidus est constitué par L S M P.

Au-dessous de L S, on a une solution solide homogène après refroidissement suffisamment lent, et, au-dessous de S M, de la solution solide englobée dans l'eutectique, tandis qu'au-dessous de M P on a des lamelles de graphite entourées d'eutectique.

Au-dessous du solidus, on a donc, d'après la loi des phases :

1° Au-dessous de L S — solution solide;

2° Au-dessous de S M P — solution solide + graphite.

*Équilibre labile à cémentite.* — Un refroidissement plus rapide, ou la présence de certains constituants, peut produire dans l'alliage liquide surfusion du graphite, il y a suppression de M N et, au lieu de graphite, il y a séparation de cémentite dans le liquide.

On a alors la courbe M′ N′, l'équilibre liquide-cémentite, et qui se trouve au-dessous de M N.

Le liquidus se compose de L M′ et M′ N′, se coupant en M′.

La solidification se termine par la formation de l'eutectique solution solide-cémentite correspondant à M′

La ligne S′ P′ correspond à 1.130°, alors que S P correspond à 1.150°.

S′ correspond à 1,70 de carbone, alors que S correspond à 1,40.

Après solidification, on a les deux phases cémentite et solution solide.

Pour la suite de la solidification, on trouve la partie inférieure du diagramme déjà étudiée.

*Passage d'un équilibre stable à un équilibre labile.* — Les éléments favorisant l'équilibre stable sont : la forte teneur en carbone, la température élevée, la présence de silicium, d'aluminium, le refroidissement lent pour les fontes.

Les éléments favorisant l'équilibre labile à cémentite sont : le refroidissement des aciers, le refroidissement rapide des fontes, les faibles teneurs en silicium, aluminium, les fortes teneurs en manganèse.

Le graphite prend donc naissance pendant la solidification et pendant le refroidissement consécutif à la solidification.

Le recuit d'une fonte à cémentite, ou fonte blanche, peut donner naissance au graphite par suite de la décomposition du carbure de fer.

Inversement, on ne peut passer du système graphite stable au système cémentite labile sans repasser par la solution solide ou liquide fer-carbone.

# TITRE VII

## CHAPITRE IX

## STRUCTURE DES ALLIAGES FER — CARBONE
## LES CONSTITUANTS MICROGRAPHIQUES

1° *Structure primaire ou macrostructure.* — Elle correspond aux dendrites (feuilles de fougères) provenant de la solidification progressive du lingot. L'hétérogénéité chimique de la solution solide fer-carbone permet cette apparition sous l'action de réactif.

Cette *macrostructure* est modifiée par tous les travaux mécaniques de forgeage et est peu sensible aux traitements thermiques subséquents (fig. 29)

2° *Structure secondaire ou microstructure.* — La solution solide, d'autre part, s'organise en grains, dont les contours ou joints forment un réseau de solidification, ce qui constitue une nouvelle organisation d'origine cristalline sensible aux travaux mécaniques de forgeage et aux traitements thermiques subséquents.

Ces deux organisations se confondent et se différencient partiellement, ou subsistent conjointement.

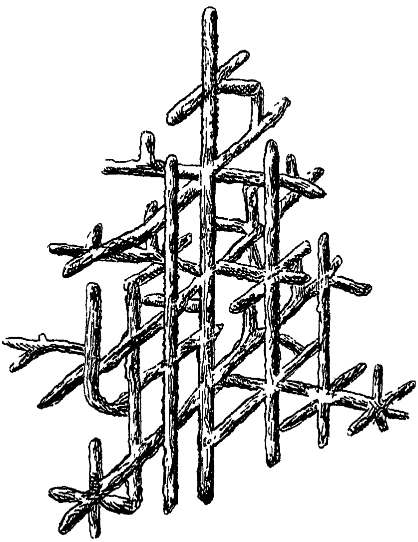
Elles sont formées avant qu'au refroidissement l'acier ait atteint le point $A_3$. C'est donc en présence de ces deux organisations que l'acier, au refroidissement, franchira la zone de transformation et la zone des revenus.

Dès le franchissement des points $A_3$, au refroidissement, l'élément *proeutectoïde* (ferrite ou cémentite) se sépare de la solution solide, s'isole dans les joints des grains, ou se sépare à l'intérieur de chaque grain en s'orientant cristallographiquement.

Dans le premier cas, on a la *structure cellulaire.*

Dans le deuxième cas, on a la structure de *Widmanstaetten.*

Cette structure secondaire demande en général, pour être vue



Structure schématique d'un cristal discontinu.

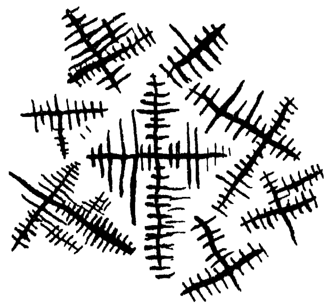


Schéma de cristaux révélés par l'attaque sur métal brut de coulée



Le forgeage brise les cristaux et les couche dans le sens d'écoulement du métal.

Fig. 29

dans ses détails, l'emploi du microscope. C'est la *microstructure* de l'acier.

3° *Aspect micrographique.* — Enfin, au point $A_1$, la perlite se forme, naissant de la solution solide à 0,9 de carbone partout où elle se trouve (c'est-à-dire dans les espaces cellulaires et intercellulaires) et formant des amas répartis.

Ce sont les grains de perlite, qu'il ne faut pas confondre avec les grains de la structure secondaire.

Cette dernière est pour ainsi dire le cadre de ce tableau d'ensemble que nous appellerons *Aspect micrographique.*

La micrographie et la macrographie se complètent mutuellement. Elles permettent l'étude approfondie d'un acier et révèlent son histoire.

Il faut donc, avant tout, retenir que la macrostructure ou structure primaire, qui prend naissance à température élevée, n'est pas intéressée par les traitements thermiques, recuit, trempe, revenu, dont les températures encadrent, en s'en approchant, les températures extrêmes de la zone de transformation.

Au contraire, la microstructure ou structure secondaire est intéressée par les traitements thermiques.

La modification que ces derniers lui occasionnent est une des raisons de leur emploi.

Toutes les structures sont intéressees par les traitements mécaniques de forgeage.

*Application de la macrographie.* — *a*) Étude de la macrostructure de la coupe d'un lingot d'acier, pour voir la répartition des édifices dendritiques.

*b*) Étude du forgeage d'un lingot.

Les dendrites finissent par être réduites à un faisceau parallèle au sens du laminage. Appréciation possible du corroyage.

*c*) Recherche du mode de forgeage employé pour une pièce et conclusions relatives aux résistances de cette pièce dans diverses directions.

Cette investigation fait connaître si la pièce a été moulée ou forgée.

*Constituants micrographiques.* — Les constituants des alliages ferreux sont :

Les métarals, à savoir : la ferrite, la cémentite, le graphite.

Les agrégats, à savoir : la perlite, l'osmondite, la troostite et la sorbite.

Sans tenir compte de cette division, nous allons donner quelques renseignements sur ces différents constituants.

Sur un échantillon d'acier attaqué à l'acide picrique, nous pouvons distinguer :

La *Ferrite* qui forme le fond blanc, c'est du fer $\alpha$ libre, tendre, relativement peu résistant et fortement magnétique.

Dans le fer, il n'y a que la ferrite disposée en polyèdres.

La *Perlite.* — Au fur et à mesure que la nuance de l'acier durcit, apparaissent des parties noires qui constituent la perlite.

La perlite est un eutectoïde fer-carbone, constitué de masses alternées de ferrite et de cémentite.

C'est un conglomérat d'environ 6 parties de ferrite et 1 partie de cémentite. Pure, elle contient 0,90 % de carbone et 99,10 % de fer. Au microscope, elle a généralement un aspect lamellaire, formé de lignes blanches « cémentite » se détachant sur fond plus obscur « ferrite ».

Ce fond plus obscur tient à ce que la ferrite, plus attaquable, s'est creusée plus que la cémentite. Ce mélange de ferrite et de cémentite est un mélange eutectique.

La *Cémentite* est un carbure de fer $Fe^3C$.

C'est le constituant le plus dur de l'acier. Il raie le verre et le feldspath, et non le quartz.

De 0 à 0,9 % de carbone, les aciers sont constitués par des îlots de perlite sur un fond de ferrite.

Ces îlots augmentent constamment et, à 0,9 % de carbone, ils ont envahi toute la masse.

L'acier à 0,9 % de carbone, qui est uniquement composé de perlite, est dit acier eutectoïde.

Les aciers au-dessous de 0,9 % sont dits hypoeutectoïdes et les aciers au-dessus de 0,9 % sont dits hypereutectoïdes.

Les aciers hypereutectoïdes sont constitués par de la perlite et de la cémentite libre.

Le *Graphite* se présente dans les fontes qui peuvent contenir du carbone libre ou graphite.

L'*Austénite* est la solution solide de fer et de carbone telle qu'elle existe au-dessus des points de transformation ou telle qu'elle est conservée aux basses températures avec une transformation modérée, par refroidissement rapide ou par la présence d'éléments retardateurs (Mn, Ni, etc...) comme dans l'acier au manganèse à 12 % et l'acier au nickel à 25 %.

La *Martensite.* — Quand on examine au microscope la texture d'un acier trempé, on voit apparaître de fines aiguilles rectilignes qui semblent orientées suivant trois directions faisant entre elles un angle de 60°. C'est la *martensite.*

La *Troostite*, *Sorbite*, *Osmondite.* — Entre la martensite (constituant des aciers trempés) et la perlite (constituant des aciers recuits) se trouve un certain nombre de constituants ou aspects intermédiaires (troostite, sorbite).

La troostite apparaît, soit en réchauffant un peu au-dessous de 400° de l'acier trempé, c'est-à-dire martensitique, soit en refroi-

dissant à une allure intermédiaire de l'acier dans la zone de transformation.

De petites pièces trempées à l'huile ou à l'eau à une température du milieu de la zone de transformation, ou le cœur de grosses pièces trempées à l'eau au-dessus de la zone de transformation, donnent la troostite.

La troostite est habituellement associée à la martensite, tandis que le constituant sorbite l'est à la perlite.

Elle se présente sous forme de grosses taches noires.

La sorbite est la texture ordinaire des aciers trempés et revenus entre 400° et 650°.

La sorbite peut encore être obtenue par une trempe au point $A_1$.

Quoique légèrement moins ductile que l'acier perlitique pour une teneur donnée en carbone, l'acier sorbitique possède une résilience et une limite élastique si grandes, qu'on peut obtenir une combinaison plus élevée de ces propriétés dans les aciers sorbitiques que dans les aciers perlitiques, en choisissant une teneur en carbone légèrement plus faible que celle employée pour un acier perlitique.

De là l'emploi des aciers sorbitiques, c'est-à-dire trempés d'abord, puis revenus avec précaution, pour les pièces métalliques exigeant la meilleure qualité.

L'aspect sorbitique dénote une belle résilience.

M. Le Chatelier avait proposé, au Congrès de Copenhague, de réunir la troostite et la sorbite sous le nom d'*Osmondite*. Mais, au Congrès de New-York, la troostite et la sorbite ont reconquis leur place, et l'osmondite est considérée comme un élément intermédiaire entre la troostite et la sorbite.

# TITRE VIII

# TRAITEMENTS THERMIQUES DES ACIERS

## CHAPITRE X

## NOTIONS PRÉLIMINAIRES

Rappelons les notions préliminaires suivantes, en les appliquant plus particulièrement aux aciers :

a) *Facteurs entrant en jeu dans l'exécution des traitements thermiques des aciers.* — Deux facteurs entrent en jeu dans le mécanisme des traitements thermiques des aciers, à savoir :

1° La *température de chauffe* en vue du traitement thermique;

2° La *vitesse de refroidissement* consécutive à cette chauffe.

Pour une infinité de valeurs de ces deux facteurs, il y a :

soit *recuit*.

soit *trempe*,

soit *hypertrempe*,

soit une quantité d'états intermédiaires constituant :

des *recuits partiels*,

des *trempes partielles*,

des *hypertrempes partielles*.

Suivant les valeurs respectives des températures de chauffe et des vitesses de refroidissement, la transformation au refroidissement est normale et totale (600-650°) et il y a *recuit;* elle est rejetée par-

tiellement ou totalement à basse température (200-300°) et il y a trempe *partielle ou totale*, elle disparaît partiellement ou totalement à basse température et il y a *hypertrempe partielle ou totale.*

Pour une température de chauffe déterminée, la *vitesse critique* est celle pour laquelle le dédoublement du point de transformation au refroidissement fait son apparition.

Nous complèterons plus loin ces notions préliminaires indispensables à l'étude du Recuit (chap. XI), de la Trempe (chap. XII) et du Revenu (chap. XIII).

b) *Modifications générales apportées dans les aciers par les traitements thermiques.* — L'acier est en somme soumis à un cycle thermique défini par les lois de chauffage et de refroidissement adoptées. L'*état final* dépendra à la fois de l'état initial et des conditions dans lesquelles le cycle thermique a éte décrit.

S'il y a identité absolue entre l'état initial et l'état final, il y aura *réversibilité*, et *irréversibilité* dans le cas contraire.

Le parcours du cycle thermique suivant des conditions déterminées de V et de θ peut apporter aux aciers qui y sont soumis des modifications intéressant :

l'état *physico-chimique*,

l'état *structural*,

la *forme géométrique* de la pièce (avec création possible de tensions internes).

*État physico-chimique.* — Il peut y avoir dans les aciers modification de l'état du *carbone*, soit à l'état de solution solide, soit à l'état combiné ($Fe^3C$). Il peut y avoir modification de l'état allotropique du fer (fer α, fer β, fer γ).

Il peut y avoir modification dans la *densité*, le passage du fer de l'état α à l'état γ étant accompagné d'une augmentation de la densité.

*État structural.* — Il peut y avoir modification de l'état structural, c'est-à-dire modification de la grosseur des grains de l'acier, modification dans la répartition des constituants micrographiques. affectant l'aspect d'un mélange ultra-fin après trempe suivie ou non de revenu ou presentant la *coalescence*, utilisée dans les aciers hypereutectoïdes pour avoir le minimum de dureté.

*Déformation de la pièce.* — Au cours des traitements thermiques, il s'établit des différences de températures instantanées entre les divers points de la pièce dues au mode de propagation de la chaleur au sein de la masse. Les dilatations sont donc différentes en ces divers points, entre lesquels il se produit des *tensions internes et des écrouissages consécutifs aux déformations.*

On conçoit que ces phénomènes sont particulièrement fonction de la conductibilité du métal et de la forme des pièces, les faibles épaisseurs étant rapidement échauffées alors que le milieu des parties épaisses ne peut prendre la température qu'après un certain retard.

Si la *déformation* est purement élastique, il y a réversibilité entière, c'est-à-dire qu'après retour à la température ordinaire il ne subsiste ni déformation ni tension.

Si la déformation est à la fois *élastique et permanente* et se produit à une température relativement basse, il y a déformation avec tension et écrouissage après retour à la température ordinaire. Au cours du cycle thermique, il peut même y avoir rupture, c'est-à-dire *tapure*, lorsque la capacité de déformation a été dépassée, ce qui a lieu lorsque la limite d'allongement de l'acier a été franchie pour une température du cycle.

Si la déformation *permanente s'est produite au-dessus de la limite de viscosité*, il y a déformation sans tensions internes après retour à la température ordinaire.

Ceci montre que le cycle thermique doit être régi d'après les considérations suivantes :

1° Il doit procurer l'état physico-chimique et l'état structural recherché.

2° Il doit être conduit de façon à éviter les ruptures ou tapures et à réduire au minimum les déformations avec les inconvénients qu'elles engendrent.

## CHAPITRE XI

# RECUIT DE L'ACIER

*Définition et but du recuit.* — Rappelons que :

*Le recuit est le traitement thermique consistant en un chauffage au-dessus du point de transformation, suivi d'un refroidissement de vitesse inférieure à la vitesse critique de trempe.*

Il y a plusieurs variables :

1° Écart de la température de chauffage au delà de la température du point de transformation;

2° Durée du maintien du métal à cette température.

3° Vitesse de refroidissement avec vitesse *maximum* comme limite supérieure.

Au delà de cette limite, il y aurait dédoublement des points critiques, c'est-à-dire trempe partielle, puis totale.

Suivant les résultats recherchés, on peut conventionnellement classifier les recuits comme il suit :

a) *Recuits d'adoucissement* procurant la destruction du durcissement dû à la trempe ou l'atténuation de celui dû à l'écrouissage.

b) *Recuits de régénération*, permettant de procurer au métal la texture fine compromise, par exemple, par la surchauffe.

A cette terminologie, que la pratique a consacrée, nous jugeons utile d'ajouter une troisième sorte de recuit.

c) *Recuits de stabilisation.* — Ces recuits ont pour but d'obtenir l'équilibre moléculaire aussi parfait que possible, la destruction intégrale des tensions et comme l'a montré M. Portevin, l'homogénéisation chimique par diffusion des éléments en solution solide.

Notons que cette division est basée sur le but à atteindre, sans impliquer par elle-même des différences essentielles dans les procédés techniques ou « modus operandi » employés.

C'est ainsi que les deux premiers recuits, recuits *d'adoucissement* et recuits de *régénération* se différenciant par leur terminologie, peuvent comporter un mode opératoire identique.

Le recuit de *stabilisation* est très spécial.

Il ne constitue d'ailleurs jamais un traitement final, étant donné la grosse cristallisation qu'il provoque, cristallisation qu'il y aura lieu de détruire ultérieurement par un traitement thermique adéquat, en vue d'éviter la fragilité.

*Grain de l'acier.* — « Dans le travail de l'acier, on cherche toujours à obtenir le grain le plus fin possible, surtout si les objets fabriqués doivent avoir une grande ténacité (absence de fragilité) et une grande résistance.

« Si le grain de la cassure est fin, on dit que l'acier est de bonne qualité et bien travaillé; au contraire, s'il est gros, on dit que l'acier est mal travaillé et sans résistance. » (Tchernoff.)

D'autre part, Portevin (*Revue de Métallurgie*, juin 1913) s'exprime ainsi :

« Pour les grains de la solution solide « fer-carbone », il correspond à chaque température une limite de grosseur du grain (Loi de Howe).

« Si l'on examine au microscope, après déformation, la surface préalablement polie d'un métal ou d'un alliage, on observe que, dès qu'il y a déformation permanente, il apparaît une quantité de lignes fines, qui sont parallèles dans un grain, mais en général variables de direction d'un grain à l'autre.

« La structure cristalline est ainsi mise en évidence sans attaque, car les limites de grain sont révélées par les changements brusques de direction de ces lignes.

« On a donné à ces lignes le nom de *Slipbands*.

« Si l'on pousse la déformation, il apparaît dans un grain un deuxième système de slipbands parallèles entre elles et recouvrant les premières, puis un troisième d'orientation différente.

« La déformation se fait donc par le mécanisme du glissement de lamelles orientées suivant des systèmes de plans de glissement ou plans de translation, et les slipbands ne sont que l'apparition sur les surfaces polies des différences de niveau créées par les glissements.

« En résumé, un grain est un solide cristallin de forme extérieure quelconque ou pseudo-cristalline; dans tous les cas, pour un même

grain, les propriétés *physiques* (dilatation, tension superficielle, pouvoir thermo-électrique, résistance électrique, etc...) chimiques (vitesse de réaction, de dissolution) et mécaniques (limite élastique, dureté) sont fonctions de la direction et identiques pour des directions parallèles. »

Après solidification, l'alliage se trouve partagé en grains n'ayant aucune forme extérieure géométrique régulière et dont chacun correspond à un individu possédant une orientation cristalline constante dans tout l'intérieur du grain.

Les joints des grains sont souvent extrêmement irréguliers et déchiquetés par suite de l'interpénétration des rameaux dendritiques.

*Lois du grain de l'acier.* — Elles peuvent se résumer comme il suit :

1° Quand la température d'un acier reste au-dessous du point de transformation supérieur $A_3$, le grain ne varie pas (petite réserve pour les aciers doux et extra-doux);

2° Chaque température de recuit $\theta$ supérieure à $A_3$ est caractérisée par un grain, qui a ses dimensions normales au bout d'un certain temps $t'$

$$G = f\ (t,\ \theta)$$

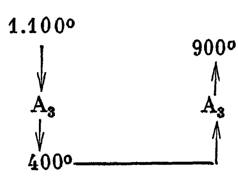
G croissant avec $\theta$.

3° La grandeur de la température $\theta$ a d'autant plus d'influence que la teneur en carbone est plus grande.

4° Tout grain acquis dans la zone thermique supérieure à $A_3$ ne peut diminuer que par un refroidissement au-dessous du point de transformation, suivi d'un recuit à la température convenable.

Exemple : à 1.100° on a un grain G.
à 900° on a encore G. si on n'est pas repassé par $A_3$.

Si, au contraire, on a suivi la marche suivante :




on obtient $g < G$.

La recherche d'un grain fin ne doit pas être perdue de vue dans tout traitement thermique, en particulier dans le forgeage.

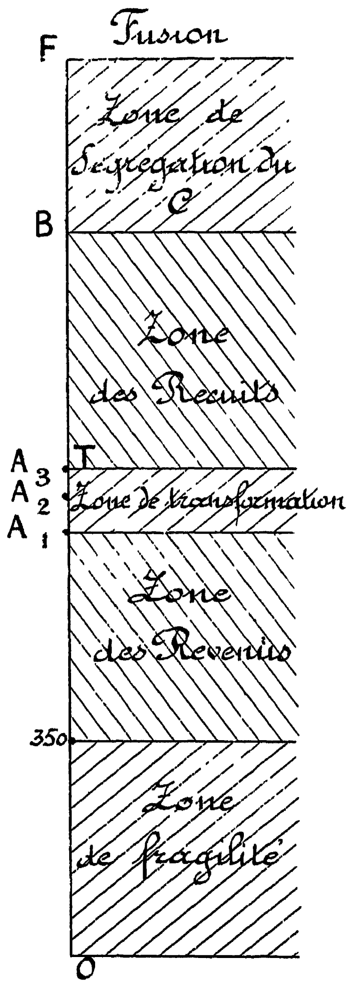



Fig. 30.

*Traitement thermique de forgeage.* — Montons l'échelle thermique (fig. 30), nous avons :

1° De 100° à 350°, une zone de fragilité ayant son maximum vers 300°;

2° De 350° à $A_1$, une zone de revenus;

3° De $A_1$ à $A_3$, la zone de transformation;

4° De $A_3$ à B, la zone des recuits complets;

5° A la température B, commence la segrégation du carbone et ultérieurement l'oxydation et la brûlure;

6° A la température F, fusion.

*Conduite du forgeage.* — Soit T la température du point $A_3$. La zone de forgeage est définie par :

$$T + 200 \text{ max.}$$
$$T - 50 \text{ min.}$$

$A_3$ variant avec les différents aciers, cette règle ne fait guère dépasser 900° pour les aciers assez fortement carburés et 1.000° pour les aciers peu carburés.

*Traitement thermique après forgeage.* — Le forgeage agit d'une façon inégale. Il produit du durcissement, des tensions d'écrouissage, un grain grossier dû à la surchauffe.

Pour remédier à ces défectuosités, on emploie l'un ou l'autre des deux procédés suivants :

1° *Recuit d'adoucissement* (Destruction de la dureté, atténuation des tensions de l'écrouissage), permettant par surcroît d'obtenir la régénération (finesse du grain).

2° *Recuit de stabilisation* (rétablissant aussi complètement que possible l'équilibre moléculaire compromis) procurant l'homogénéisation chimique, mais ne pouvant servir de traitement régénérateur. Il devra donc être suivi d'un traitement de régénération.

## I. — Recuit d'adoucissement.

*Montée de l'échelle thermique.* — De la température ordinaire à T + 50, nous traversons :

1° la zone de fragilité de 0° à 400°;

2° la zone des revenus de 400° à $A_1$;

3° la zone de transformation de $A_1$ à T + 50.

*Temps de traversée des zones.* — 1° de 0° à 400° : montée très lente. Ce résultat est obtenu de deux façons :

*a*) Mettre la pièce dans un four froid et monter très lentement et très progressivement le four;

*b*) Chauffer lentement la pièce dans une enceinte spéciale et jusqu'à 400° et la porter dans le four de recuit.

Ne jamais mettre une pièce froide dans un four chauffé aux températures ordinaires de recuit.

2° De 400° à $A_1$. — Peut être franchie vite, sans inconvénient.

3° $A_1$ à T + 50. — Séjourner à T + 50 le temps strictement nécessaire pour permettre à la transformation de s'opérer.

Durée variable, fonction de la grosseur de la pièce et de la teneur en carbone.

De toute façon, il ne faut pas rester trop longtemps, pour éviter une grosse cristallisation susceptible d'engendrer la fragilité.

*Descente de l'échelle thermique* (fig. 31). — 1° Aciers au-dessous de 0,300 de carbone (aciers extra-doux et doux).

Ces aciers sont *trempés à l'air*. On évite ainsi la grosse cristalli-

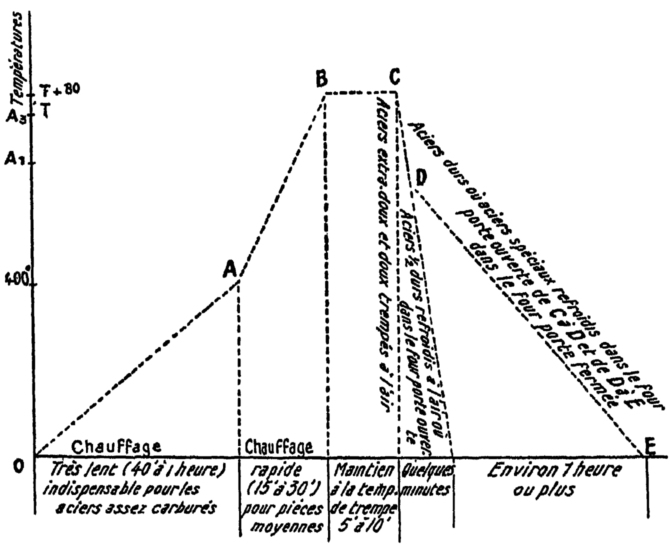



Fig. 31.

sation qui se produit particulièrement pour les aciers extra-doux refroidis très lentement. Ce dernier mode de refroidissement les rend fragiles.

On utilise ainsi pour eux le recuit *à la volée*.

2° Aciers entre 0,300 de carbone et 0,600 de carbone (Aciers demi-doux et demi-durs).

Ces aciers sont refroidis à l'air (0,300 de C à 0,500 de C), ou portes du four grandes ouvertes et en dehors de leur boîte de chauffage (0,500 à 0,600), de T + 50° à la température ordinaire.

3° Aciers au delà de 0,600 de carbone (Aciers durs, extra-durs, etc...).

Après un refroidissement rapide de T + 50° à 500 ou 600° (portes du four ouvertes), ces aciers sont refroidis lentement jusqu'à la température ordinaire (portes du four fermées).

Voir diagramme représentant la marche du traitement thermique complet pour des pièces moyennes.

*Vérification micrographique.* — L'influence des vitesses de refroidissement peut être contrôlée micrographiquement.

On constate, par exemple, pour les aciers demi-durs, que la perlite est très grossière, si on a adopté un refroidissement très lent consécutif au chauffage au-dessus du point de transformation.

Elle est au contraire fine et bien répartie, si on a appliqué les règles sus-énoncées.

## II. — Recuit de stabilisation.

Le recuit de stabilisation peut avoir lieu à une température très nettement supérieure à celle du point $A_3$, T + 200 par exemple, c'est-à-dire à une température à laquelle le métal très malléable peut se détendre avec facilité, température à laquelle il a souvent subi des déformations.

Ce recuit est suivi d'un refroidissement très lent qui, pour des pièces moyennes (bielles, arbres à cames de moteurs, etc...), peut être de l'ordre de 24 à 36 heures au moins.

Ce traitement procure l'équilibre moléculaire aussi parfait que possible, détruit intégralement les résistances passives et homogénéise par diffusion la solution solide.

Il a l'inconvénient de donner au métal un grain grossier, ayant comme conséquence la fragilité.

Un recuit de régénération, analogue au recuit d'adoucissement précédemment indiqué s'impose donc pour obtenir la texture.

Il n'est pas indispensable, si la pièce doit être trempée. Il est

néanmoins recommandable, comme nous le verrons dans l'influence des traitements thermiques successifs sur la résilience.

*Cas particulier des aciers à transformations retardées.* — Pour le chauffage, rien de changé à ce qui a été dit : toujours chauffage en deux temps.

Une complication se produit pour le refroidissement. Il faut

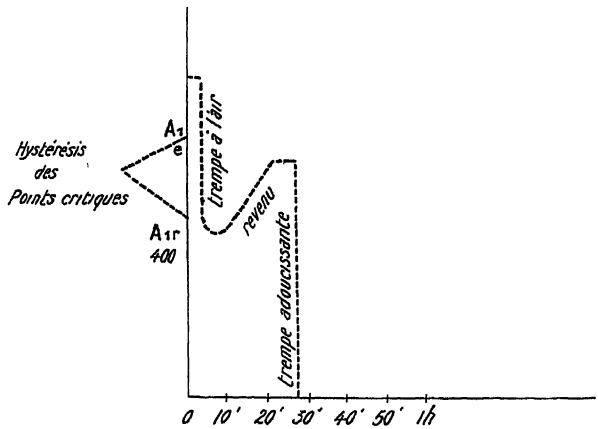



Fig. 32.

refroidir vivement jusqu'en-dessous de $A_1$; mais $A_1$, au refroidissement, est quelquefois assez bas, vers 400° par exemple. Alors, on refroidit vivement jusqu'à 400°, mais pas en-dessous, pour ne pas descendre en vitesse la zone fragile.

L'acier a commencé à prendre la trempe à l'air, par ce refroidissement de T + 50 à environ 400°, d'où nécessité de faire un revenu à une température inférieure à $A_1$ à l'échauffement, suivi d'un refroidissement rapide jusqu'à la température ordinaire, qui peut s'effectuer sans inconvénient avec un métal adouci.

C'est une sorte de trempe adoucissante.

Le diagramme ( fig. 32) montre la marche du refroidissement.

Il faut attacher une importance capitale à des recuits correctement et rationnellement exécutés.

C'est par la violation de ces règles qu'on arrive à des ruptures

dues à la fragilité occasionnée par la cristallisation du métal (boulons, pièces de moteurs, etc...).

Il ne faut pas oublier que la grosseur du grain $G = f(t, \theta)$ joue un rôle primordial. Il faut donc être maître des variables de cette fonction ($t$ et $\theta$).

# CHAPITRE XII

## TREMPE DE L'ACIER

*Définition et but.* — Rappelons que :

*La trempe est le traitement thermique consistant en un chauffage au-dessus du point de transformation, suivi d'un refroidissement de vitesse supérieure à la vitesse critique de trempe.*

Elle comporte donc une rapidité minimum de refroidissement.

La trempe, *en général*, a pour but le durcissement de l'acier.

Elle peut être un élément de régénération (aciers surchauffés, cémentation).

*Conditions de la trempe.* — La trempe doit être généralement précédée d'un recuit pour détruire les tensions de forgeage, recuit de stabilisation, recuit d'adoucissement, ou les deux à la fois.

Ces recuits font sentir leur effet pendant la période de refroidissement.

Ils ne peuvent donc être remplacés par le chauffage de trempe.

Pour la trempe, les conditions générales suivantes sont requises :

1° Existence d'un point de transformation;

2° Chauffage au-dessus de ce point de transformation;

3° Vitesse de refroidissement *minimum* comme limite inférieure.

1° *Existence d'un point de transformation.* — Cette condition est remplie avec les aciers au carbone.

Nous avons vu l'existence des points $A_1$ et $A_3$.

Au-dessus de $A_3$, nous avons :

$$\text{Carbone dissous} + \text{fer } \gamma .$$

2° *Chauffage au-dessus du point de transformation. Température de trempe.* — En appelant T la température du point $A_3$ à l'échauf-

fement, la température de trempe est *industriellement* définie par T + 50.

1° Si la température de trempe est $< T$, le métal n'est pas trempé, ou insuffisamment trempé.

2° Si la température de trempe dépasse trop T, par exemple est supérieure à T + 100, on a un $\Delta$ insuffisant et une résilience trop faible.

Le diagramme de Roozeboom, qui donne les températures des points $A_3$, nous fixe les températures de trempe pour les aciers au carbone, à savoir :

| | |
|---|---|
| Aciers extra-doux . . . . . . | 850° + 50° = 900° |
| Aciers demi-durs. . . . . . . | 750° + 50° = 800° |
| Aciers durs . . . . . . . . . . | 725° + 50° = 775° |

*Durée de chauffage à la température de trempe.* — Il ne suffit pas de chauffer au-dessus du point de transformation; il faut encore maintenir l'acier à la température de chauffage pendant un temps suffisamment long, pour que la cémentite puisse opérer sa dissolution.

*Vitesse de refroidissement. Échelle des vitesses.* — Le tableau suivant est destiné à donner des précisions aux termes vagues fréquemment employés pour qualifier la vitesse de refroidissement.

| Temps mis pour opérer une chute de 100° | Appréciation qualitative de la vitesse de refroidissement. |
|---|---|
| 1 cinquième à 1 dixième de seconde. | Ultra-rapide. |
| 1 seconde. . . . . . . . . . . . . | Très rapide. |
| 10 secondes . . . . . . . . . . . . | Rapide. |
| 1 minute . . . . . . . . . . . . . | Accélérée. |
| 5 minutes. . . . . . . . . . . . . | Moyenne. |
| 10 minutes. . . . . . . . . . . . . | Assez lente. |
| 30 minutes. . . . . . . . . . . . . | Lente. |
| 1 heure. . . . . . . . . . . . . . | Très lente. |
| 3 heures . . . . . . . . . . . . . | Excessivement lente. |

Ceci étant adopté, les termes employés gagnent en clarté et signification.

*Refroidissement lent.* — Il produirait les transformations inverses.

*Refroidissement rapide.* — C'est le refroidissement de trempe normal. Il laisse subsister une transformation partielle de fer $\gamma$ en

fer $\alpha$ (ferrite) du carbone combiné ($Fe^3C$) et du carbone dissous dans le fer $\alpha$ (état hors d'équilibre).

C'est l'état partiellement trempé. Il se présente micrographiquement sous forme de *troostite* ou *perlite* correspondant à Fe $\alpha$ + $Fe^3C$ et de *martensite* correspondant à la solution hors d'équilibre Fer $\alpha$-Carbone.

Le fait que la martensite est magnétique permet de conclure à l'existence du fer $\alpha$ dans cette martensite.

*Refroidissement ultra-rapide.* — Il laisse subsister :

Carbone dissous dans le fer $\alpha$ (état hors d'équilibre trempe normale) ou, pour certains aciers : carbone dissous dans le fer $\gamma$ (hypertrempe)

A la trempe normale correspond la martensite pure structure de transition, à l'hypertrempe l'austénite, les deux constituants existant dans les aciers mi-trempés et mi-hypertrempés.

Les facteurs vitesse de refroidissement et température de chauffe jouent un rôle primordial dans le mécanisme de la trempe, comme nous l'exposerons plus loin.

Les vitesses de refroidissement ultra-rapides ne sont pas admissibles pour la plupart des aciers spéciaux. Elles occasionnent des *tapure.*

Les vitesses rapides ou très rapides sont à peu près seules utilisables, de sorte que pratiquement les trempes industrielles laissent coexister une quantité plus ou moins grande de fer transformé, c'est-à-dire de fer $\alpha$.

*Bains de trempe.* — L'influence des bains de trempe dépend de la vitesse de refroidissement (chaleur spécifique, masse, conductibilité et température du bain de trempe).

Pratiquement, nous ne sommes limités dans la rapidité de la vitesse que par la crainte des « tapures » provenant de la nuance du métal et de la forme des pièces.

La trempe à l'eau froide (15°) est très énergique, mais souvent dangereuse.

On est amené à chercher des bains provoquant des vitesses de refroidissement moins rapides.

Tels sont les bains d'huile, d'eau bouillante, de pétrole.

La trempe à l'huile à 15° est équivalente à une trempe faite, dans les mêmes conditions de chauffage, dans l'eau à 70°.

A noter que la trempe à l'huile suivie de revenu donne à l'acier, à résistance à la traction égale, une limite élastique et une résilience inférieures à celles obtenues après trempe à l'eau et revenu identique.

A noter également qu'on peut chercher le bénéfice d'une vitesse de refroidissement « très rapide » en évitant les tapures, en opérant comme suit :

Tremper dans l'eau à 20° la pièce portée à T + 50. Sortir la pièce de l'eau avant le refroidissement complet, c'est-à-dire quand l'extérieur est environ à 300° ou 400°. L'intérieur réchauffera encore les couches externes. Le procédé devra être étudié de façon que la température moyenne finale soit inférieure à la température du revenu recherchée.

Enfin, pour la technique de la trempe, M. H. Le Chatelier recommande de tremper les pièces dans une quantité d'eau froide, fonction de leur poids. Au début, on aura une grande vitesse de refroidissement, produisant un abaissement important de la température de transformation, vitesse qui ira en s'atténuant par suite de l'échauffement de l'eau, précisément à un moment où le métal déja refroidi et peu malléable peut craindre des tapures.

On peut employer suivant le résultat cherché, un volume d'eau égal à celui de la pièce à tremper ou double de celui de cette pièce.

De toute façon, il ne faut pas oublier que les pièces présentant de grandes inégalités d'épaisseur compliquent le problème de la trempe, les parties minces étant froides avant que le réchauffage du bain de trempe exerce son influence, d'où risque de tapure.

*Trempe à l'air des aciers extra-doux.* — Nous rappelons que ces aciers sont améliorés par la trempe à l'air à 875° environ.

R et E ne subissent pas de changement, mais A et $\rho$ sont augmentés.

Cette remarque a une grande importance et une grande application pratique.

*Aciers spéciaux.* — Les aciers spéciaux sont divisés d'une façon générale en :

Aciers perlitiques,
Aciers martensitiques,
Aciers polyédriques.

D'autres aciers sont à carbures doubles ou triples.

Nous donnerons leurs traitements thermiques ultérieurement au chapitre qui les concerne.

Mais faisons de suite les remarques suivantes :

1° *Aciers perlitiques.* — Se comportent, en général, comme les aciers ordinaires au carbone, au point de vue de la trempe, sous les réserves que nous ferons pour chaque cas particulier.

Ils ont un état *doux* et un état *dur*.

2° *Aciers martensitiques.* — Certains aciers spéciaux présentent une hystérésis considérable pour l'apparition des points critiques au refroidissement. Cette apparition n'a lieu qu'à température relativement basse.

L'acier reste martensitique.

Un état *dur* sans état *doux* empêche ces aciers d'être industriels.

3° *Aciers polyédriques.* — Ces aciers n'ont pas de point critique au refroidissement au-dessus de l'ambiante.

Ils ne prennent pas la trempe et en conséquence ne comportent pas d'état *dur*.

4° *Aciers à carbures doubles ou triples.* — Exigent une température très élevée pour permettre d'obtenir la dissolution du carbure. Ont des emplois très spéciaux (outils à coupe rapide).

*Trempe à l'air.* — Certains aciers spéciaux ont une hystérésis beaucoup plus grande que celle des aciers ordinaires au carbone, de sorte qu'après chauffage au-dessus du point de transformation dans les conditions indiquées, un simple refroidissement à l'air donne la structure martensitique.

## CHAPITRE XIII

# REVENU DE L'ACIER

*Définition et but.* — Rappelons que :

*Le revenu est le traitement thermique, exécuté après trempe, consistant en un chauffage au-dessous du point de transformation.*

La rapidité du refroidissement consécutif au revenu n'a pas d'influence sensible sur la dureté, comme dans le cas du recuit ou de la trempe. Il importe cependant de la définir, étant donné la répercussion qu'exerce cette rapidité sur les tensions internes pour tous les aciers et sur la fragilité pour certains aciers.

Le revenu a généralement un but d'adoucissement; il ne peut jamais être utilisé pour la régénération.

*Influence du temps et de la température.* — Le revenu dépend :

1° De la température de revenu;

2° De la durée de chauffage à cette température.

Pour chaque température de revenu, on obtient un revenu complet au bout d'un certain temps.

Le temps nécessaire pour obtenir le revenu complet est d'autant plus grand que la température est plus basse.

*Influence du revenu sur les propriétés mécaniques.* — Pour la plupart des types d'acier dont la trempe est industrielle, nous avons établi les diagrammes donnant les propriétés mécaniques en fonction des températures de revenu.

Ces diagrammes permettent de choisir le traitement thermique donnant les propriétés recherchées.

*Double trempe.* — Cette opération consiste :

1° A chauffer à T + 25° et tremper.

2° A chauffer, après trempe, au-dessous de $A_1$ et tremper à l'air, l'huile ou l'eau.

Cette deuxième trempe permet d'arrêter net les effets du revenu, dès qu'ils sont obtenus.

C'est, en somme, une trempe suivie d'un revenu précis.

En choisissant la température convenable du revenu, on a la constitution sorbitique (puissance du constituant sorbite), préconisée par Richard et Stead en Amérique.

*Remarque.* — On peut obtenir deux R. égaux, en utilisant un acier recuit ayant comme caractéristiques :

$$R_1 \; A_1 \text{ et } \rho_1$$

ou un acier trempé et revenu ayant comme caractéristiques :

$$R_1 \; A_2 \text{ et } \rho_2$$

Dans le second cas, on obtient :

$$A_2 > A_1$$
$$\rho_2 > \rho_1$$

ce qui justifie l'emploi du traitement trempe-revenu.

*Influence de la vitesse de refroidissement après revenu sur la fragilité des aciers nickel-chrome.* — La nécessité du refroidissement rapide, après revenu, amène à parler d'un phénomène particulier, auquel il a été parfois donné le nom de ***Krupp-Krankheit***.

Tout refroidissement lent, succédant au chauffage pour revenu effectué à 600°, rend l'acier Ni-Cr plus fragile que si ce refroidissement avait été effectué rapidement, sans pour cela altérer ses autres caractéristiques mécaniques.

D'après M. Grenet, la résilience ne varie pas sensiblement lorsque la vitesse de refroidissement passe de 200° à la seconde à 200° à la minute, alors qu'elle diminue lorsque la vitesse de refroidissement passe de 200° à la minute à 25° à l'heure.

Un acier Ni-Cr (type n° 32) du tableau Standard annexé, qui, après trempe suivie d'un revenu à 600° arrêté brusquement, casse à nerf, voit sa cassure, devenir à grains avec diminution de résilience si on le maintient un certain temps à 500°, soit en le réchauffant à cette température, soit en le laissant séjourner à cette température lors du refroidissement qui suit le revenu à 600°.

Un acier ainsi amené à cassure à grains par chauffage à 500° redevient à cassure à nerf si on effectue un nouveau chauffage à 600° suivi d'un refroidissement rapide.

C'est entre 500 et 550° que se présenterait le phénomène, d'après le Dr Brearley du Technical Departement de l'Air Board.

Du travail du Dr Brearley on peut extraire les conclusions suivantes :

1° Un état fragile dangereux se présente à un degré plus ou moins grand pour tous les aciers *nickel-chrome.* Il n'est pas révélé par les essais ordinaires de traction, mais se manifeste par l'essai sur barreaux entaillés.

2° On peut éviter cette fragilité dangereuse par l'observation des règles suivantes :

*a*) Revenu au-dessus de 550° (de préférence au-dessus de 600°).

Ceci implique l'emploi d'un acier de composition convenable pour donner les résultats demandés à l'essai de traction.

*b*) Ne jamais permettre que l'acier refroidisse lentement.

3° On peut guérir cette maladie par un nouveau revenu, suivi d'un nouveau refroidissement rapide par trempe.

D'après M. Grenet. cet état maladif particulier ne se manifeste par aucune singularité physique ou micrographique.

L'essai sur barreaux entaillés acquiert une importance particulière, pour les aciers nickel-chrome, puisque cet essai est le seul pouvant mettre en évidence cet état dangereux.

## CHAPITRE XIV

# ÉTUDE DU MÉCANISME DES TRAITEMENTS THERMIQUES

Les expériences de Chevenard (1917) et le Mémoire de MM. Portevin et Chevenard au Congrès de l'Iron and Steel Institute à Paris (5 et 6 septembre 1921) constituent une contribution très importante à cette étude du mécanisme des traitements thermiques.

Nous allons les résumer ci-après.

*Étude de Chevenard sur les influences réciproques de la température de trempe et de la vitesse de refroidissement sur le dédoublement des points critiques.* — « Pour un acier, avec des conditions de refroidissement données, l'aspect de la transformation au refroidissement dépend de la température atteinte à la chauffe.

« Quand on élève graduellement cette température initiale, la transformation au refroidissement, d'abord unique (600° — 650°), s'abaisse progressivement; à partir d'une certaine température *t*, la transformation se dédouble, une partie étant rejetée aux basses températures (200° à 300°); puis la partie rejetée s'accroît au détriment de la partie qui subsiste à haute température, et, au delà d'une température *t'*, le rejet est complet.

« Lorsqu'on fait croître la vitesse de refroidissement, les températures *t* et *t'* s'abaissent très rapidement et se rapprochent l'une de l'autre. Aux très grandes vitesses, *t'* se confond avec la fin de la transformation à l'échauffement. »

M. Broniewski complète comme suit cette importante considération.

« Pour un acier eutectoïde à 0,86 % de carbone, on trouve les conditions de trempe suivantes :

| Vitesse à 750° — Degrés par seconde | Dédoublement de la transformation — *t* | *t'* |
|---|---|---|
| 450° | 950° | 1.000° |
| 700° | 770° | 790° |
| 1.200° | Fin de la transformation à l'échauffement 720°. | |

« Lorsque la transformation est unique, l'acier n'est pas trempé, et sa structure est perlitique.

« Au dédoublement de la transformation, l'acier est formé par un mélange de martensite et de troostite. La trempe complète n'a lieu que lorsque toute la transformation est rejetée à basse température, et la structure est purement martensitique.

« Nous voyons que la transformation normale de l'austénite en martensite ne s'effectue pendant la trempe qu'à une température relativement basse de 200° environ. L'austénite conservée par une trempe très dure peut être intégralement changée en martensite par un refroidissement dans l'air liquide, comme l'a montré Osmond (1899). »

*Étude de Portevin et Chevenard relative aux traitements thermiques des aciers. — Courbes caractéristiques.* — Il faut étudier le rôle des deux variables dont il a été question au cours de cette étude des traitements thermiques à savoir :

la ***température de chauffage*** $\theta$

et la ***vitesse de refroidissement*** V.

De la valeur de ces deux variables dépend l'*état final.*

Les deux éléments $\theta$ et V doivent être mesurés ou définis et l'état final doit être contrôlé.

1° *Définition de* V. — Pratiquement, la vitesse de refroidissement est la vitesse *moyenne* entre deux températures assez éloignées l'une de l'autre ou se définit par la durée qui s'écoule entre le passage par ces deux températures.

*Contrôle de l'état final.* — A un état final déterminé correspondent des propriétés mécaniques.

Les caractéristiques mécaniques se divisent en deux groupes :

| | | | |
|---|---|---|---|
| R | E | $\Delta$ | **d'une part.** |
| A | $\Sigma$ | $\rho$ | **d'autre part.** |

D'une façon générale, les variations d'un groupe sont en sens inverse des variations de l'autre groupe, et les éléments d'un même groupe varient dans le même sens.

La connaissance d'un élément d'un groupe suffit donc.

En particulier, les variations de cet élément peuvent servir de contrôle des variations de l'état final. MM. Portevin et Chevenard, pour des raisons de simplicité et de commodité ont choisi $\Delta$.

D'autre part, l'état final dépend de la valeur quantitative des transformations qui se sont opérées au cours du refroidissement. L'amplitude de ces transformations a été étudiée par les auteurs au moyen du dilatomètre Chevenard.

*Transformations au refroidissement et mesure de leur amplitude.* — On peut faire croître, soit la température de chauffage $\theta_c$ au-dessus du point de transformation, soit la vitesse V, consécutive à ce chauffage.

Si l'on suppose fixe la température de chauffage $\theta_c$ et qu'on fasse croître la vitesse de refroidissement, il y a une vitesse $V_0'$ pour laquelle le point de transformation au refroidissement Ar', apparaissant à température élevée voisine de celle du même point à l'échauffement, se dédouble. Il y a une fraction de transformation Ar' à température élevée, la fraction complémentaire Ar'' ayant lieu à température basse (350°). *C'est la vitesse critique de trempe.*

Progressivement, la fraction Ar' diminue, en même temps que la fraction Ar'' augmente.

Puis Ar' disparaît, Ar'' passant par son maximum d'intensité. Si la vitesse de refroidissement augmente encore, Ar'' diminue à son tour et finalement disparaît.

Pour certains aciers, il y a apparition au-dessous de 200° d'une transformation Ar''' qui se substitue à Ar'' et disparaît à son tour.

*Point de vue qualitatif.* — A Ar' correspond la formation de la *perlite ou troostite.*

$$Fe\,\alpha + Fe^3C.$$

caractérisant l'*état recuit.*

A Ar'' correspond la formation de la *martensite*, solution solide hors d'équilibre.

$$Fe\,\alpha - C$$

caractérisant l'*état trempé.*

A l'absence de transformation correspond la persistance à froid de la solution solide, à chaud ou *austénite.*

$$Fe\,\gamma - C$$

caractérisant l'*état hypertrempé.*

*Point de vue quantitatif.* — Suivant l'importance des transformations Ar′ et Ar″, on a des états recuits, partiellement recuits et trempés, trempés, partiellement trempés et hypertrempés et enfin intégralement hypertrempés.

Il est donc particulièrement intéressant d'évaluer l'importance respective de ces transformations.

Pour le faire, MM. Portevin et Chevenard ont adopté conventionnellement les règles suivantes.

Considérons la figure ci-après qui représente une courbe différentielle dilatométrique.

Les intensités sont mesurées de la manière suivante :

Ar′ par la distance verticale du point d'inflexion $I_1$ à la branche

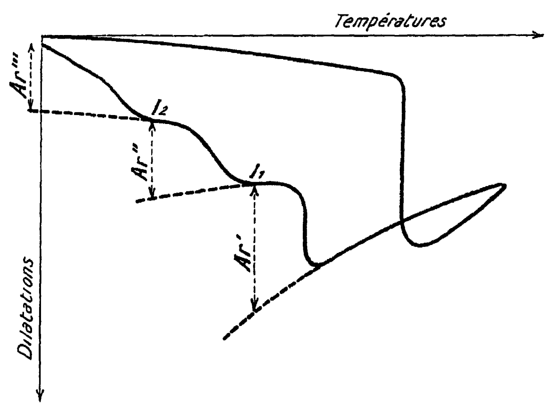



Fig 33.

de courbe extrapolée correspondant à la dilatabilité de l'état stable à chaud.

De même pour Ar″ et Ar‴ comme le montre la figure.

Le segment Ar′ indique la quantité de troostite ou de perlite.

Les segments additionnés Ar″ et Ar‴ indiquent la quantité de martensite.

Au maximum de Ar″ + Ar‴, correspond le *maximum de dureté.*

Le diagramme suivant établi par MM. Portevin et Chevenard, dans lequel la température de chauffage a été prise comme variable résume toute la question.

*Courbes caractéristiques.* — Étant donné que l'élément « dureté » Δ

a été pris par les auteurs comme critère de l'état final, on voit qu'en faisant varier à la fois θ et V, on aura une infinité de Δ.

Si, pour chaque valeur de $\theta_c$ et V, prises comme coordonnées

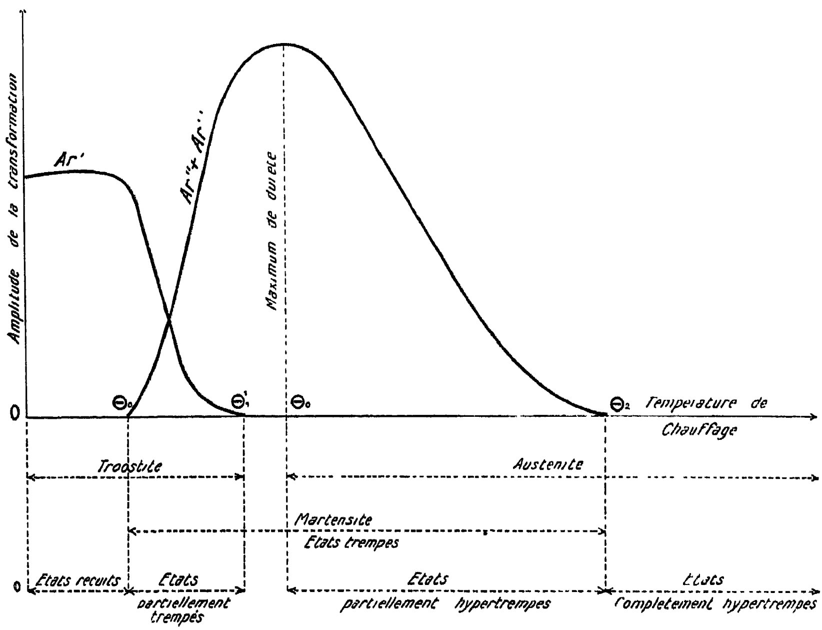



Fig. 34.

dans le plan, on fait correspondre la valeur de Δ en élévation, on obtient une surface.

$$f\ (\theta_c,\ V,\ \Delta)$$

En coupant cette surface par le plan $\Delta = \lambda$ on a une courbe dite «isosclère» qui représente les états d'égale dureté obtenus au moyen d'une infinité de combinaisons $\theta_c$, V.

Pour obtenir un état donné, on peut donc jouer respectivement de θ et V dans les conditions indiquées par la courbe isosclère correspondante.

Sous une forme nécessairement schématique, l'exposé de MM. Chevenard et Portevin apporte une indiscutable clarté dans l'étude du processus des traitements thermiques des aciers.

# CHAPITRE XV

## PERTURBATIONS — CAUSES — REMÈDES

§ 1. Surchauffe et brulure. — Reportons-nous au diagramme d'équilibre de Roozeboom pour fixer les différentes températures de chauffage, et souvenons-nous de la loi du grain :

$$G = f\ (t,\theta)$$

dans laquelle $\theta$ est la température de chauffage et $t$ la durée de chauffage.

1° *Point figuratif de chauffage au-dessous et dans le voisinage de A B du diagramme de Roozeboom.* — Un maintien prolongé des aciers doux et extra-doux à une température légèrement inférieure à $A_3$ crée la fragilité. Il y a d'autant plus de ferrite non dissoute en solution solide que l'acier est plus doux. C'est le développement des cristaux de cette ferrite qui occasionne cette fragilité pour les aciers doux et extra-doux. Dans ces mêmes conditions, une semblable fragilité n'est pas à craindre pour les aciers de nuance mi-doux et au-dessus.

2° *Point figuratif de chauffage dans la région A B C S L du diagramme de Roozeboom.* — L'acier a été chauffé à haute température et pendant un temps variant de la durée normale à une durée trop prolongée.

Les grains de la solution solide se sont développés et, malgré la décomposition de cette solution solide au refroidissement, la grosse cristallisation de la solution solide exerce son influence. Le métal est fragile.

Dans ces deux cas, on remédie à la ***surchauffe*** par un ***recuit de régénération*** ou, par une ***trempe de régénération*** (aciers extra-doux de cémentation).

Les deux traitements peuvent être employés successivement, trempe suivie de recuit (aciers plus carburés que les aciers extra-doux). Ce double traitement donne des résultats meilleurs.

3° *Point figuratif de chauffage dans la région L S M sans dégagement gazeux.* — On a alors une masse hétérogène, comprenant une partie liquide, de composition donnée par l'abscisse de la courbe liquidus à la température à laquelle est porté le métal, et une partie solide, de composition donnée par l'abscisse correspondante de la courbe solidus. Le liquide carburé est resté dans les joints sans sortir à l'extérieur de la pièce et sans dégagement gazeux.

Au refroidissement, cette hétérogénéité persiste partiellement.

Pour régénérer : 1° On chauffe à température très élevée, quoique au-dessous du point de fusion commençante, dans laquelle on s'était engagé, en restant par conséquent dans la région A B C S L, soit vers 1.200°.

Dans cette région à une phase, *l'homogénéisation* se fera d'autant plus vite que la température sera plus élevée.

2° On exécutera ensuite le recuit normal de *régénération.*

4° *Point figuratif de chauffage dans la région précédente avec dégagements gazeux ayant amené la séparation des grains.*

a) *Les gaz sans se dégager à l'extérieur restent dans le liquide occasionnant des soufflures.*

Il faut avoir recours : 1° à un nouveau forgeage pour supprimer les soufflures;

2° Au traitement thermique précédent pour obtenir l'homogénéité;

3° Au recuit de régénération normal.

En tout cas, le façonnage de la pièce est irrémédiablement perdu.

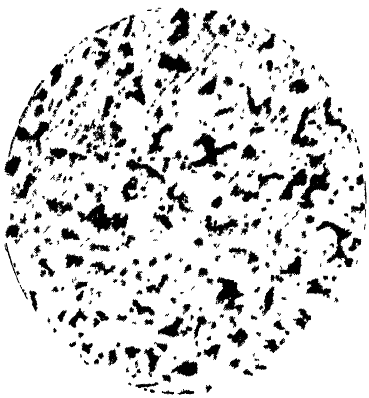
b) *Les gaz expulsant une partie du liquide se sont dégagés à l'extérieur.* Il y a donc eu oxydation à laquelle le forgeage ne saurait remédier. La pièce est inutilisable et ne peut servir que comme *riblon pour alimenter les fours* des aciéries.

### *Emplois simultanés de la trempe et du recuit de régénération pour remédier à la surchauffe.*

La trempe est un procédé de régénération pour les aciers extra-doux.

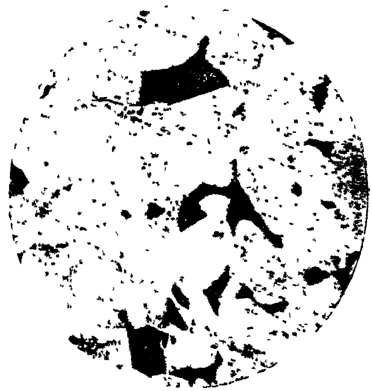
Nous avons expérimenté les deux traitements, trempe à T + 25 suivie de recuit de régénération à T + 50 pour tous les aciers.

# RÉGÉNÉRATION DE L'ACIER DOUX SURCHAUFFÉ



1

Recuit à 850°



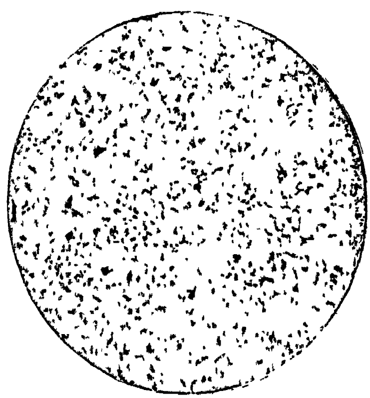
2

Chauffe à 1 200°



3

Recuit à 850°
et refroidi rapidement



4

Trempé à 850° puis recuit à 850°
et refroidi rapidement

après chauffage à 1.200°.

PLANCHE VI

# RÉGÉNÉRATION DE L'ACIER DEMI-DUR SURCHAUFFÉ



5

Recuit à 820°



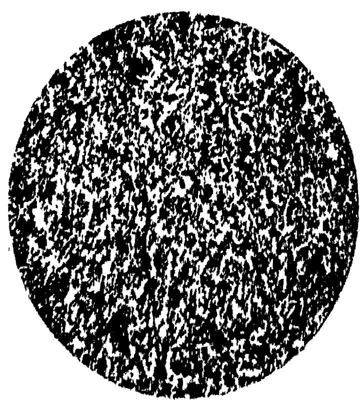
6

Chauffé à 1.500°



7

Recuit à 820°
suivi
d'un refroidissement à vitesse moyenne



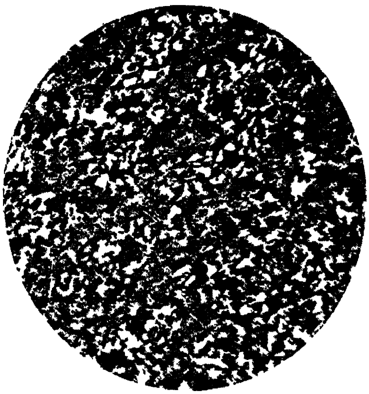
8

Trempé à 850°, puis recuit à 850°
suivi
d'un refroidissement à vitesse moyenne

après chauffage à 1.150°

Planche VII

# RÉGÉNÉRATION DE L'ACIER DUR SURCHAUFFÉ



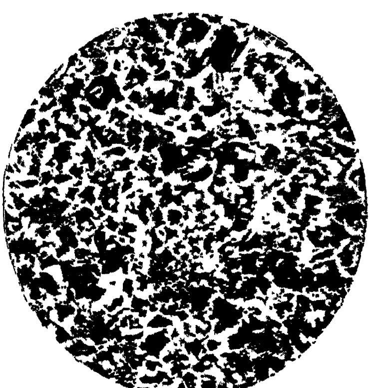
9

Recuit à 850°



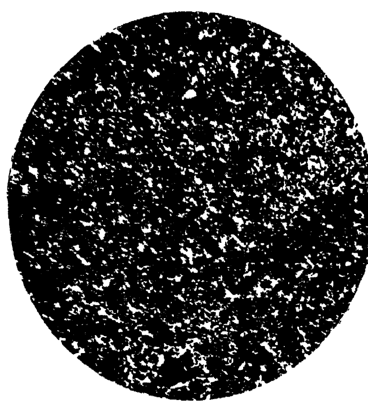
10

Chauffé à 1.100°



11

Recuit lentement à 750°
et refroidi lentement



12

Trempé à 850°, puis recuit à 850°
et refroidi lentement

après chauffage à 1.100°.

Planche VIII

Ce double traitement s'est montré généralement supérieur à la régénération seule.

Il a l'inconvénient d'exiger une trempe qui peut déformer les pièces. Mais il est à recommander quand c'est possible.

Voir les micrographies ci-jointes (pl. **VI, VII, VIII**), donnant l'aspect des aciers au carbone de différentes nuances, que nous avons soumis aux traitements suivants :

1° Surchauffe;

2° Recuit;

3° Trempe et recuit.

L'aspect des micrographies permet de conclure.

Notons que la surchauffe s'attaque particulièrement à l'allongement et à la résilience.

§ 2. ÉCROUISSAGE DE L'ACIER. — a) *Traitement thermique destiné à remédier à l'écrouissage de l'acier.* — Ce traitement thermique est, nous l'avons vu, le recuit d'adoucissement, précédé ou non du recuit de stabilisation.

Il s'impose après tout travail du métal et particulièrement tout travail de martelage, frappage, étirage à chaud au-dessous de $a_1$, ou après toute déformation mécanique à la température ordinaire.

Souvent l'écrouissage est partiel. Il n'en est pas moins dangereux, et l'on est obligé de recuire toute la pièce.

Les recuits que nous spécifions dans ce chapitre sont les recuits d'adoucissement.

Les recuits de stabilisation qui peuvent les précéder, si on veut un résultat complet, comme nous l'avons dit, ne sont pas mentionnés. Leur principale caractéristique est un refroidissement excessivement lent.

*Détermination de la température de recuit après écrouissage. — Surcristallisation.* — Le recuit, après écrouissage, doit se baser sur des considérations spéciales.

M. Charpy, dans un compte rendu à l'Académie des Sciences (août 1910), a montré que, pour les aciers doux, l'écrouissage du métal augmente dans une proportion considérable la vitesse de développement des grains, à une température donnée.

Suivant l'état d'écrouissage, les dimensions linéaires des grains varient de 1 à 10. Ce développement des grains fait naître la « fra-

gilité », la résilience devenant pratiquement nulle dès que la dimension des grains acquiert une certaine valeur.

Il y a une sorte de *surcristalisation.*

L'intervalle de température dans lequel se produit cette fragilité, a pour limites 650° et 800°.

Des barres d'acier doux, étirées à la filière et recuites dans cet intervalle, étaient assez fragiles pour casser en tombant à terre.

M. Stead, puis M. Sauveur (Congrès de New-York de 1912) ont également étudié ce phénomène de cristallisation.

M. Robin a cherché à connaître les variations du grain de l'acier extra-doux écroui avec la température de recuit.

Ce phénomène de surcristallisation après écrouissage ne se produit pas ainsi avec les aciers carburés.

Nous tirons donc les conclusions suivantes pour le recuit des aciers écrouis :

1° *Aciers extra-doux et doux.* — Recuit à 900°.

Maintien à cette température pendant le temps strictement nécessaire (quelques minutes).

Refroidissement rapide.

2° *Aciers demi-doux, demi-durs et durs.* — Recuit à T + 50° (800-775-730) dans les conditions précédemment indiquées.

b) *Écrouissage de forgeage.* — Après un recuit régénérateur précédemment défini, les constituants ont repris leur place et la résistance est restée légèrement supérieure à la résistance de recuit. Il subsiste donc encore une trace d'écrouissage, trace qui s'élimine par un second recuit.

Notons que, lorsqu'on veut la disparition complète de l'écrouissage, il est souvent nécessaire de procéder à un deuxième recuit. La prolongation du premier recuit, en vue de détruire l'écrouissage amènerait en effet une grosse cristallisation engendrant la fragilité. Pour remédier à un mal, on tomberait dans un autre mal aussi grand.

Donc exécuter, s'il le faut, deux recuits conformes à la règle et non un seul recuit très prolongé.

c) *Écrouissage dû au travail à froid.* — Nous avons fait exécuter des écrouissages méthodiques sur des aciers en barres, de façon à connaître les variations des écrouissages avec les déformations subies.

# ÉCROUISSAGE DE FORGEAGE

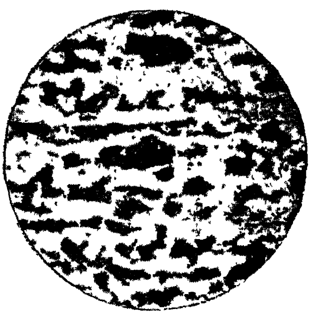
## ACIER DEMI-DUR



**1**
Avant forgeage. R = 55 kg.



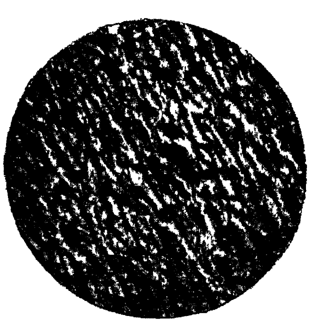
**2**
Forgeage au-dessus de $a_1$. R = 56 kg.



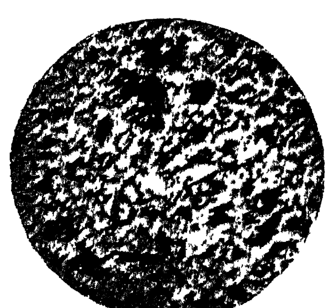
**4**
Forgeage au-dessus de $a_1$. R = 56 kg.



**3**
Forgeage légèrement au-dessous de $a_1$.
R = 59 kg



**5**
Travail à froid. R = 84 kg.



**6**
Échantillon 5.
Recuit à 850°
suivi de refroidissement à l'air. R = 58 kg.

PLANCHE IX

Ces essais ont porté sur deux nuances :

1° Aciers extra-doux;

2° Aciers demi-durs. Ces deux aciers ont été choisis parmi ceux utilisés par la maison Farman pour la confection des boulons d'aéroplanes.

*Aciers extra-doux à froid.* — En partant de barres de 26 mm, on a confectionné par étirage à froid des barres de 25,5, 25, 24,5, 24, 23,5, 23, 22,5, 22, 21,5, 21, 20,5, 20, 19,5, 19, 18,5, 18, sans aucun recuit intermédiaire.

Les déformations étaient calculées par la formule :

$$\frac{S \text{ initiale} - s \text{ finale}}{s \text{ finale}}$$

Des barreaux de traction confectionnés avec ces différentes barre méthodiquement déformées, c'est-à-dire écrouies, ont été tractionnées sur machine Amsler Lafont.

*Résultats.* — Ces résultats sont résumés sur les diagrammes (fig. 34).

Notons que, pour une simple déformation de 10 %, calculée d'après la formule précédente, on obtient les variations de caracté ristiques suivantes :

| | R | Δ | A | ρ |
|---|---|---|---|---|
| État recuit . . . . . . . . . . . . . | 37 | 115 | 37 | 20 |
| Déformation de 10 % . . . . . . . . | 45 | 155 | 14 | 9 |

Outre la perturbation moléculaire, qui compromet la conservation, cette petite déformation a donné de la fragilité au métal, dont la résilience est passée de 20 à 9.

*Aciers demi-durs.* — Des expériences analogues ont été faites avec des aciers demi-durs (Voir diagramme, fig. 35).

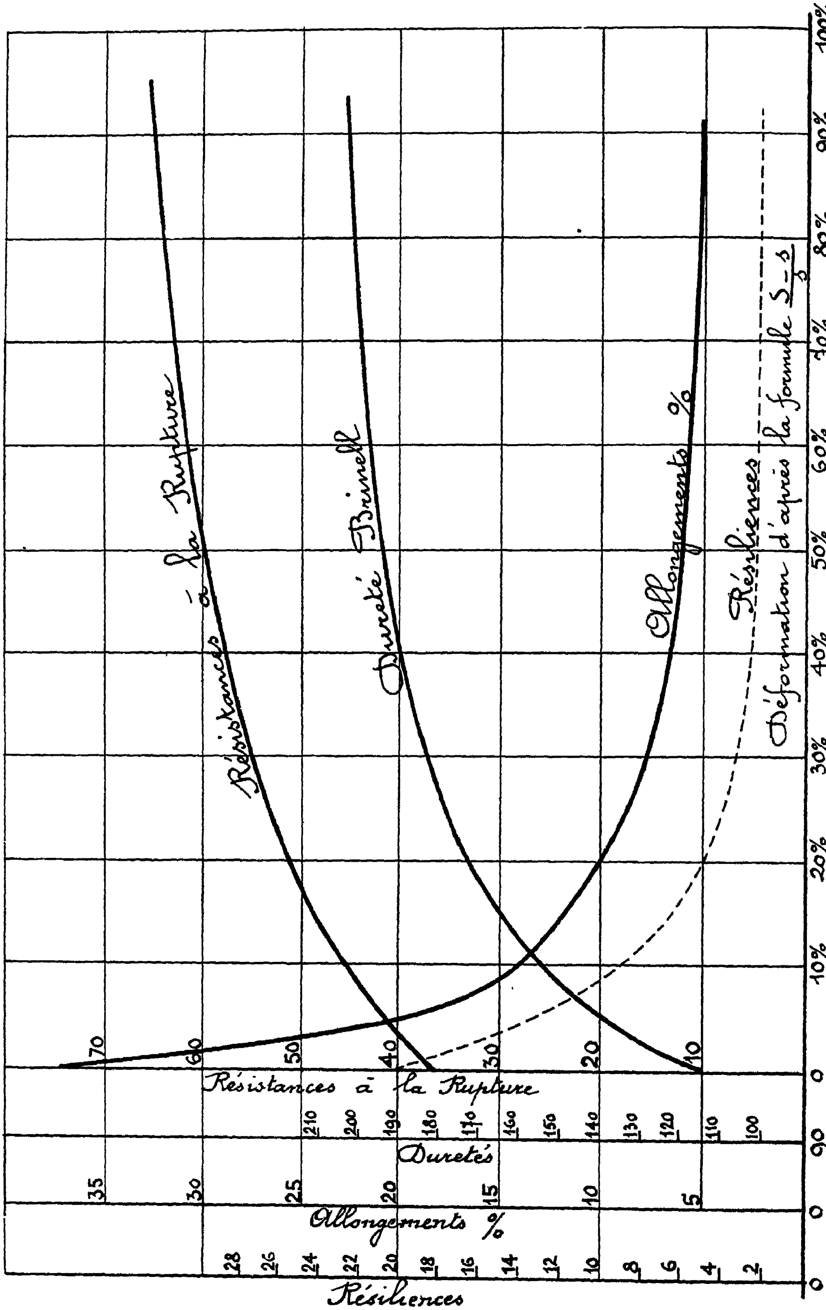



Fig. 35.

*Écrouissage.* — Variation des propriétés mécaniques de l'acier extra-doux en fonction de la déformation du métal.

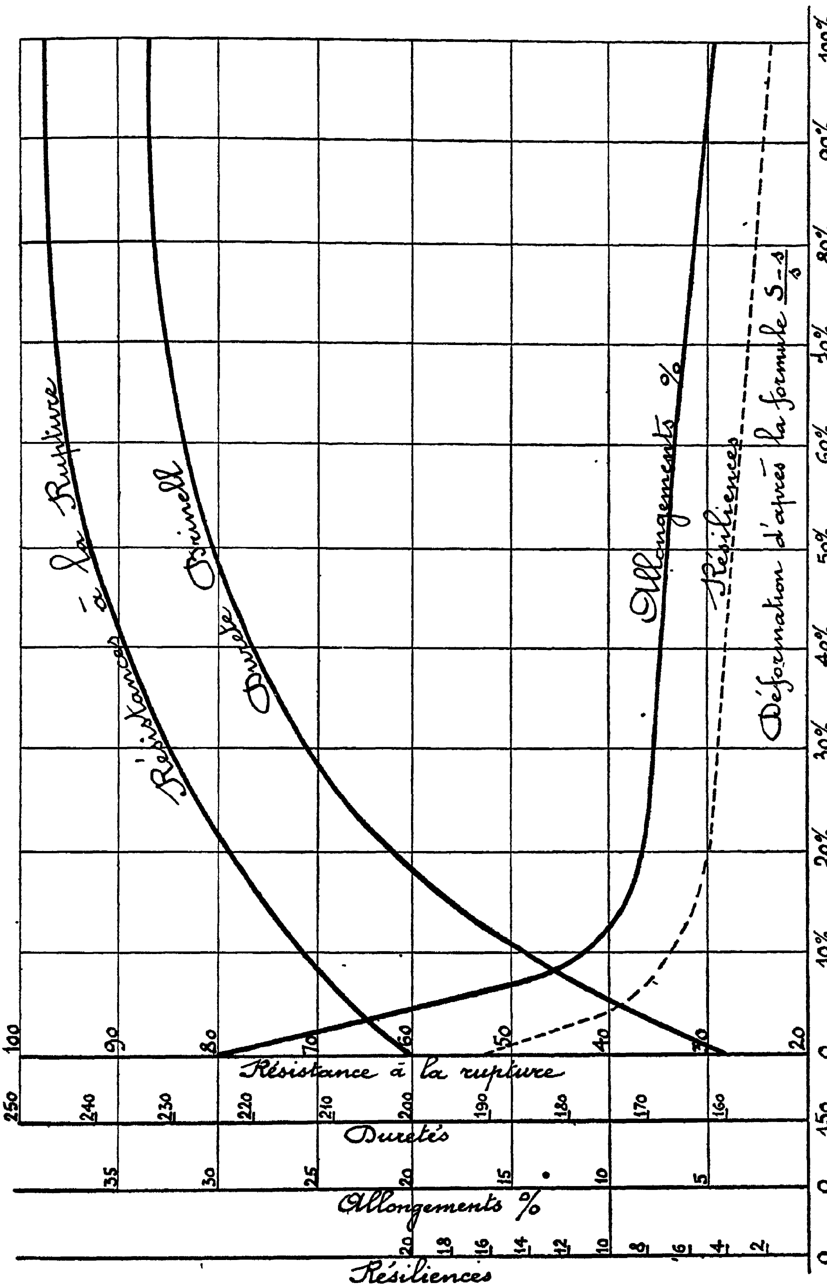



Fig. 36.

*Écrouissage.* — Variation des propriétés mécaniques de l'acier demi-dur en fonction de la déformation du métal.

Pour la même déformation de 10 %, on a obtenu les variations suivantes :

| | R | Δ | A | ρ |
|---|---|---|---|---|
| État recuit . . . . . . . . . . . | 60 | 160 | 30 | 16 |
| Déformation de 10 % . . . . . . . . | 71 | 182 | 12 | 5,5 |

Le métal est devenu fragile et d'emploi dangereux en aviation.

De plus, des empreintes à la bille ont été prises :

1° Au milieu de la section terminale du barreau;

2° Sur le bord de ladite section.

Avec de légères variations dans un sens ou dans l'autre, on a trouvé au centre et sur le bord la même dureté, depuis les faibles étirages jusqu'aux étirages importants.

Les courbes de dureté et de résilience sont tracées sur les diagrammes (fig. 34 et 35).

*Conclusions.* — 1° Les déformations superficielles, légères, obtenues par étirage (4 ou 5 dixièmes sur le diamètre), affectent jusqu'au cœur du métal les caractéristiques de ce dernier;

2° Les déformations légères initiales amènent de suite les plus grosses modifications dans les propriétés mécaniques, les déformations supplémentaires subséquentes affectant proportionnellement moins les mêmes propriétés et finissant par n'avoir sur elles qu'une influence minime, lorsque le métal est complètement écroui.

A ce moment, les allongements et résiliences sont insignifiants et les charges de rupture sont approximativement doublées. Donc, de la faiblesse d'une déformation, il ne faut pas conclure à la faiblesse de ses conséquences;

3° Les résistances vives de rupture étant immédiatement affaiblies par des traces d'écrouissage, il y a lieu de réduire ces dernières au minimum, ce qui, dans la plupart des cas, exige un recuit.

d) *Contrôle de l'écrouissage des aciers.* — Nous employons généralement la formule :

$$e = \frac{R - r}{r}$$

$r$ = résistance à l'état recuit;

R = résistance à l'état d'emploi ou de livraison.

Nous pouvons d'ailleurs utiliser la dureté comme un indicateur d'écrouissage, en nous servant des diagrammes que nous avons établis et qui correspondent à des moyennes.

Exemple :

*Acier extra-doux.*

| État recuit | 1^er^ écrouissage | 2^e^ écrouissage |
|---|---|---|
| $e = 0$ | $e = 20\%$ | $e = 25\%$ |
| $\Delta = 115$ | $\Delta = 115 + 25$ | $\Delta = 115 + 40$ |
| $\rho = 20$ | $\rho = 10$ | $\rho = 8$ |
| $A\% = 38$ | $A\% = 16$ | $A\% = 12$ |

*Acier demi-dur.*

| État recuit | 1^er^ écrouissage | 2^e^ écrouissage |
|---|---|---|
| $e = 0$ | $e = 10\%$ | $e = 15\%$ |
| $\Delta = 160$ | $\Delta = 160 + 15$ | $\Delta = 160 + 20$ |
| $\rho = 16$ | $\rho = 10$ | $\rho = 8$ |
| $A\% = 28$ | $A\% = 20$ | $A\% = 12$ |

La nécessité dans laquelle on se trouve en aviation de contrôler l'écrouissage qui a occasionné tant de mécomptes, conduit à édicter des règles simples permettant d'établir une limite large, qu'une surveillance facile, mais attentive, interdira de dépasser. C'est un barrage établi contre des déformations mécaniques exagérées qu'on a imposées au métal. C'est une assurance et une sécurité.

Ajoutons que l'analyse micrographique permet à un œil exercé un contrôle de l'état moléculaire qui ne doit pas être négligé et qui mérite de trouver place dans un cahier des charges.

## TITRE IX

# LES TRAITEMENTS CHIMIQUES DES ACIERS

## CHAPITRE XVI

## CÉMENTATION PAR LE CARBONE

Nous avons exposé, dans le premier volume de cet ouvrage, comment le terme « cémentation » avait été généralisé à la suite de recherches récentes.

Cette expression ne signifie plus seulement le durcissement des aciers par apport superficiel de carbone; elle désigne l'ensemble des diffusions intermétalliques solides.

Nous étudierons dans ce chapitre la cémentation de l'acier par le carbone.

*Cémentation de l'acier par le carbone.* — Nous avons longuement décrit dans le premier volume la théorie de la cémentation et avons justement pris comme exemple celle de l'acier par le carbone.

Rappelons simplement que le but est d'obtenir des pièces résilientes qui soient en même temps dures en surface.

Pour cela, il faut une âme en acier doux et une surface en acier dur.

C'est ce que permet la cémentation par le carbone.

Les pièces en acier doux sont chauffées, au milieu d'un cément carburé, à une température permettant la solubilité du carbone dans le fer, c'est-à-dire aux environs de 900°.

Le temps de maintien à cette température règle la profondeur de cémentation (habituellement 4 à 8 heures).

Après ce traitement, les pièces sont trempées, généralement deux fois à l'eau :

*a*) Trempe de régénération vers 900-950°, pour l'affinage du grain de métal surchauffé;

*b*) Trempe de durcissement de surface, vers 775-800°.

Parfois, avec les aciers spéciaux de cémentation, au nickel et au nickel-chrome, on peut se contenter d'une seule trempe, vers 800-850°.

*Aciers employés.* — On utilise le plus souvent des aciers ordinaires extra-doux et doux dans lesquels :

$$\begin{aligned} C &< 0,12 \\ Mn &< 0,50 \end{aligned}$$

avec des teneurs en soufre et phosphore inférieures à 0,04.

On emploie quelquefois pour la fabrication de certains axes des aciers ordinaires, demi-doux ou même demi-durs, cémentés; mais cette pratique n'est pas à conseiller.

Les aciers doux ou demi-doux au nickel ou au nickel-chrome, ayant les compositions suivantes :

$$\begin{aligned} C &< 0,12 \\ Ni &= 1,8 \text{ à } 2,5 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C &< 0,12 \\ Ni &= 2 \text{ à } 2,5 \\ Cr &= 0,5 \text{ à } 0,6 \end{aligned}$$

sont par contre à recommander spécialement pour les pièces délicates.

On commence même à cémenter des aciers nickel-chrome trempant à l'air, que l'on réserve pour des emplois spéciaux comme des engrenages de changements de vitesse.

Il faut bien veiller à la bonne désoxydation de ces aciers lors de leur élaboration; la présence d'oxydes de fer dissous provoque en effet la formation de « taches molles » non carburées qui ne durcissent pas à la trempe.

*Céments utilisés.* — Le principal cément solide est le cément de

Caron, renfermant 60 % de charbon de bois et 40 % de carbonate de baryum.

Comme cément liquide, on doit signaler le cyanure de potassium fondu (il y a des précautions à prendre contre les émanations toxiques).

Comme cément gazeux, on a l'oxyde de carbone ou des gaz carburés divers.

*Pratique de la cémentation par le carbone.* — Avec les céments solides, on opère dans des boîtes ou caisses fermées comme nous l'avons déjà indiqué dans le premier volume. Ces récipients sont en acier, ou mieux, en cupro-aluminium 90-10 ou en alliages nickel-chrome. Leur forme doit être bien étudiée en fonction de celle des pièces, afin que le chauffage et la cémentation de celles-ci soient bien homogènes.

Avec les céments liquides, on emploie des bains analogues aux bains de trempe.

Avec les céments gazeux, on place généralement les pièces dans des tambours tournants, à axe horizontal.

On contrôle la marche de la cémentation à l'aide d'éprouvettes-témoins.

*Réserves.* — Les parties des pièces ne devant pas être cémentées sont protégées contre la pénétration du carbone par l'un des trois procédés suivants :

*a*) garniture de terre réfractaire;

*b*) cuivrage électrolytique (voir volume I : Dépôts électrolytiques); le premier passage, au bain de cyanure est parfois remplacé par un nickelage rapide, puis on cuivre au bain de sulfate;

*c*) peinture au cuivre, appliquée au pinceau, et composée de poudre de cuivre, silicate de soude et potée d'émeri.

*Résultats cherchés.* — *Surface.* — La couche superficielle doit avoir la plus grande dureté possible compatible avec l'absence de fragilité en service.

Ce résultat est d'habitude obtenu quand la teneur de surface est voisine de 0,9 % de carbone (eutectoïde à peine dépassé); il ne faut pas avoir trop de cémentite posteutectoïde, sans quoi l'on risque des écaillages par fragilité.

*Profondeur.* — L'épaisseur de cémentation dépend du travail demandé à la pièce.

La moyenne est de 8 à 10/10 mm.

Les épaisseurs de cémentation trop faibles ne permettent pas d'obtenir une teneur en carbone suffisante en surface.

L'allure de la décroissance de la teneur en carbone en fonction de la profondeur a également son importance : il ne faut pas qu'elle

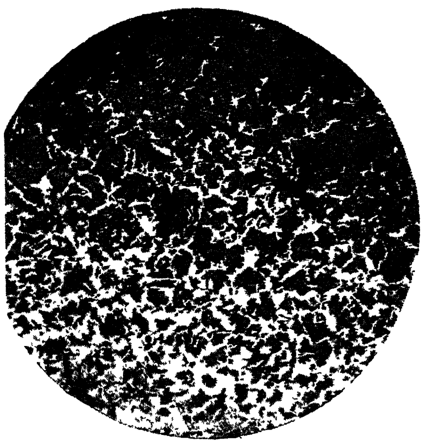


Fig 37.
Surface d'un acier cémenté par le carbone. Brut de traitement × 200.

soit trop brusque, sinon l'on risque des décollements de la couche carburée. La micrographie fig. 37 donne un aspect favorable de cémentation (état brut non trempé).

*Usinage après cémentation.* — Les rectifications après traitement doivent se faire avec grand soin et sous un arrosage abondant, sans quoi l'on produit de petites criques superficielles dues aux échauffements locaux.

## CHAPITRE XVII

# LA NITRURATION

---

La nitruration, ou cémentation de l'acier par l'azote, est un procédé très récent de durcissement superficiel de l'acier étudié par Fry.

Sa mise au point industrielle est due à Fry et à L. Guillet.

*Principe de la méthode.* — Le principe repose sur l'examen du

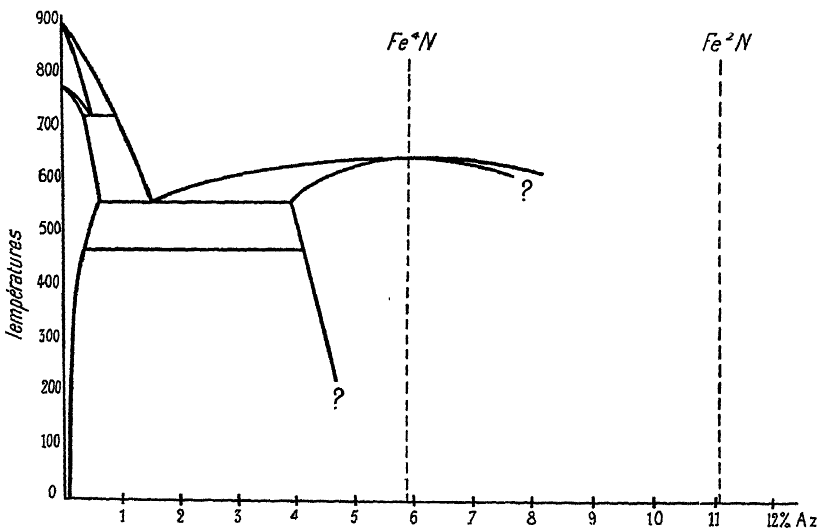



Fig. 38.
Diagramme fer-azote (proposé par Fry).

diagramme d'équilibre fer-azote proposé par Fry (fig. 38). On voit que l'on peut obtenir des nitrures de fer et qu'il existe des

zones de miscibilité; il y a donc cémentation possible, conformément aux principes généraux énoncés dans le premier volume.

Le procédé industriel de diffusion de l'azote dans le fer ou les aciers consiste à chauffer les pièces aux environs de 500°, dans une atmosphère d'ammoniaque.

Si l'on fait cette opération avec de l'acier ordinaire, il y a pénétration *très rapide* de l'azote *jusqu'à cœur;* il se forme dans toute la masse des nitrures de fer en aiguilles (fig. 39 à 42) qui rendent les pièces extrêmement fragiles; la rapidité de la diffusion est telle qu'il n'est pas possible de régler la pénétration seulement jusqu'à une faible profondeur superficielle; si l'on y parvenait de manière industrielle, on n'aurait d'ailleurs pas une dureté suffisante en surface.

Le problème revenait donc à freiner vigoureusement la diffusion de l'azote vers l'intérieur, de manière à limiter la pénétration sur une faible bande en profondeur, et à concentrer suffisamment d'azote dans cette bande pour réaliser une très grande dureté.

Cela a été obtenu par l'emploi d'aciers spéciaux, le constituant essentiel d'addition étant l'aluminium qui convient admirablement à ce freinage de la pénétration d'azote (fig. 43 et 44).

L'opération de nitruration est longue : il faut environ 90 heures pour obtenir l'épaisseur habituellement optimum de 7 à 8 dixièmes de millimètre, mais elle est par cela même très facile à régler.

*Avantages du procédé.* — Les avantages du procédé sont les suivants :

*a*) la dureté obtenue est très considérable, bien supérieure à celle de la cémentation par le carbone;

*b*) elle est réalisée de manière bien plus régulière; on n'a pas à craindre ici de points mous;

*c*) cette dureté est obtenue *directement*, sans traitement thermique consécutif au traitement proprement dit de cémentation; d'où suppression de tous les inconvénients inhérents aux trempes après cémentation par le carbone (déformations des pièces, criques, etc.);

*d*) le chauffage même prolongé vers 500° ne provoque pas de surchauffe du métal;

*e*) on réalise de très beaux polis, naturellement favorables à la bonne conservation des surfaces frottantes;

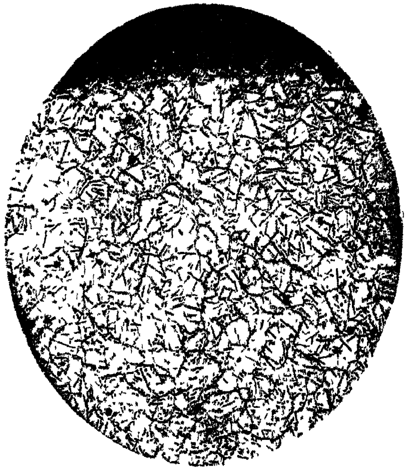


Fig. 39.

Nitruration d'un acier ordinaire extra-doux
Bord × 88.



Fig. 41

Nitruration d'un acier ordinaire extra-doux.
Cœur × 500



Fig. 40.

Nitruration d'un acier ordinaire extra-doux.
Cœur × 200.



Fig. 42.

Nitruration d'un acier ordinaire demi-dur.
Cœur (Ferrite blanche, perlite foncée
et aiguilles de nitrure) × 500

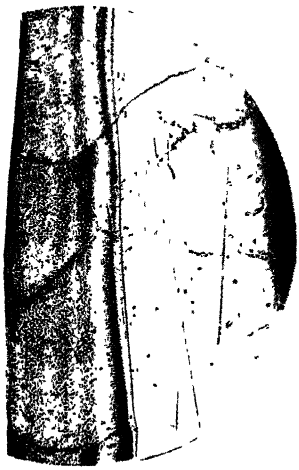


Fig. 43.

Couche superficielle d'un acier spécial (C = 0,05 % — Al = 7 %) nitruré × 150

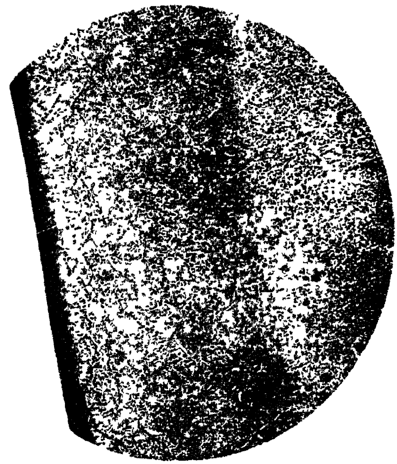


Fig. 45

Couche superficielle d'un acier spécial Al-Cr nitruré × 200



Fig. 44.

Couche superficielle d'un acier spécial (C = 0,8 % — Al = 7 %) nitruré × 150.

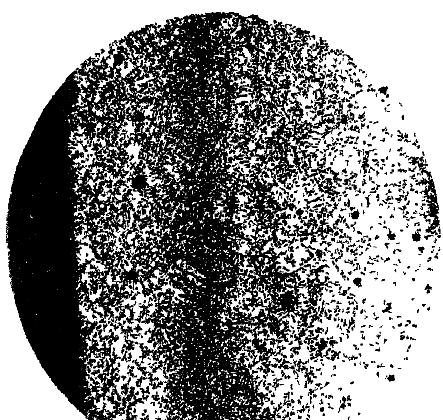


Fig. 46.

Couche superficielle d'un acier special Al-Cr (différent de celui de la fig. 45) nitruré × 200.

*f*) la couche nitrurée présente enfin une résistance à la corrosion améliorée.

La seule précaution à observer provient du très léger gonflement provoqué par la pénétration de l'azote; mais ce gonflement est extrêmement régulier et il suffit d'en tenir compte dans l'usinage initial de la pièce.

*Mise au point des aciers spéciaux de nitruration.* — L'opération s'effectuant aux alentours de 500° et n'exigeant aucun traitement thermique ultérieur, il était normal de songer (études de M. L. Guillet) à l'emploi d'aciers spéciaux qui, trempés avant nitruration, devaient acquérir, pendant le traitement nitrurant lui-même, des caractéristiques optima de revenu.

D'où l'essai d'aciers aluminium-chrome (fig. 45 et 46), puis d'aciers aluminium-chrome-nickel, le nickel venant combattre la fragilité des premiers.

Mais alors, le traitement prolongé à 500° provoquait la maladie de Krupp dont nous avons parlé page 112.

L'addition de molybdène a sérieusement diminué cette fragilité de revenu.

Le problème a donc été résolu au mieux par l'emploi d'aciers spéciaux *aluminium-nickel chrome-molybdène;* la composition est voisine de :

C = 0,25 Al = 1,30 Ni = 1,60
Cr = 2,00 Mo = 0,35

Il vaut mieux, pour ces aciers, intercaler entre la trempe et la nitruration, un revenu vers 675°; on obtient alors après nitruration une résilience de 13 à cœur et 10 en surface.

*Emplois industriels.* — Les applications industrielles sont importantes, surtout pour les pièces non soumises à chocs violents; dans ce dernier cas, en effet, l'acier ci-dessus est encore insuffisamment résilient, surtout si l'épaisseur des pièces est faible.

On emploie couramment le procédé pour le traitement des cylindres de moteurs à explosion de grande puissance; l'usure et par suite la consommation d'huile sont très fortement réduites.

De même pour les engrenages, arbres à cames, poussoirs, excentriques, etc.

Pour les vilebrequins, une conséquence intéressante est la possibilité de réduction de la longueur des portées de bielles; cela permet d'augmenter la largeur des bras, d'où diminution appréciable des vibrations.

## CHAPITRE XVIII

# CÉMENTATION DE L'ACIER PAR DES CORPS AUTRES QUE LE CARBONE

*Cémentation par l'aluminium.* — Nous avons déjà parlé de ce traitement à propos de la théorie générale de la cémentation.

Les pièces en acier sont chauffées vers 900 à 1.000° dans une

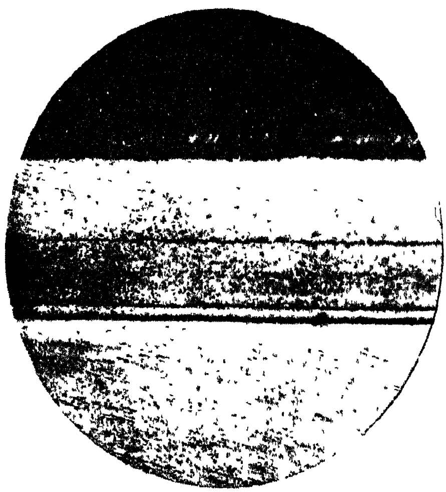


Fig. 47.

Cémentation d'un acier extra-doux par l'aluminium (4 heures de chauffage à 900°). Brut de traitement × 200.

poudre d'aluminium ou de ferro-aluminium, additionnée d'un peu de chlorure d'ammonium.

Il se forme en surface deux couches superposées de solutions solides d'aluminium dans le fer (Micrographie, fig. 47).

La pratique de l'opération est analogue à celle de la cémentation par le mélange de Caron.

La diffusion de l'aluminium est d'autant plus lente et difficile

que l'acier est plus carburé; on opère généralement sur acier ordinaire extra-doux ou doux.

La propriété essentielle de ce mode de revêtement est la résistance aux corrosions oxydantes à température élevée; la tenue à chaud de pièces comme des armatures de fours, des tubes de pyromètres, des barres de foyers, etc. est très grandement améliorée, surtout pour les températures inférieures à 1000-1050°.

*Cémentation par le silicium.* — La cémentation des aciers par des poudres à base de ferro-silicium donne en surface un alliage à 15-20 % de silicium, extrêmement résistant aux corrosions acides.

La diffusion du silicium est beaucoup plus rapide que les précédentes.

*Shérardisation.* — La shérardisation est une cémentation des aciers par le zinc; on opère en four tournant, les pièces étant chauffées vers 400° au milieu d'une poudre de zinc, chlorure d'ammonium et alumine, et dans une atmosphère réductrice (généralement d'hydrogène).

Le recouvrement est bien adhérent; il procure une bonne résistance aux corrosions ordinaires; à chaud, il tient mieux que la galvanisation au trempé.

*Cémentation par le manganèse.* — La cémentation des aciers par des poudres à base de ferro-manganèse, provoque une appréciable élévation de dureté superficielle, surtout après trempe; la dureté est légèrement supérieure à celle des cémentations ordinaires par le carbone.

Le traitement s'effectue entre 900 et 1.000° pendant 4 à 6 heures.

*Cémentations diverses.* — Il a été également essayé des cémentations de l'acier par le chrome, le tungstène, le molybdène, le vanadium, etc...; les résultats présentent parfois quelque intérêt au point de vue durcissement, tenue à chaud, conservation du poli, etc.

CHAPITRE XIX

# LES TRAITEMENTS CHIMIQUES DES ALLIAGES FERREUX CONTRE LA CORROSION

Nous avons donné dans le premier volume de cet ouvrage la description de tous les traitements chimiques généraux permettant de lutter contre la corrosion.

Galvanisation, étamage, projection d'un métal fondu par pulvérisation, peintures, dépôts électrolytiques, etc...

Nous n'y reviendrons pas et rappellerons seulement que, dans les cas des recouvrements métalliques, les meilleurs métaux de protection sont ceux qui suivent le fer dans la série des tensions, soit dans l'ordre ci-après :

le cadmium, le chrome, le zinc, le manganèse, l'aluminium, le magnésium.

Par contre, nous décrirons ci-après les procédés ne s'appliquant exclusivement qu'aux alliages ferreux; ils sont au nombre de quatre :

1° Procédé anodique : oxydation des fontes;

2° Procédés purement chimiques :

— bleuissage de la fonte,

— bronzages des aciers,

— parkerisation des aciers et des fontes.

I. Oxydation anodique des fontes. — Le procédé Sestini et Rondelli consiste en une oxydation anodique des fontes dans une solution de ferrite de sodium; le détail opératoire est conforme à la description générale des oxydations anodiques énoncée dans le premier volume; l'aspect obtenu est noir; la résistance à la corrosion, moyenne.

II. Procédés purement chimiques. — A) *Bleuissage de la fonte.* — La réaction cherchée est celle de la vapeur d'eau sur le fer, découverte par Lavoisier :

$$3\ Fe + 4\ H^2O = Fe^3O^4 + 4\ H^2$$

Les essais systématiques de Bower et Barff montrèrent, par la suite, que l'oxydation optimum, pour l'obtention d'un revêtement bien adhérent, doit être recherchée avec la vapeur surchauffée. Bower et Barff perfectionnèrent encore la méthode en faisant passer sur les pièces, préalablement portées au rouge, d'abord des gaz brûlés de gazogène, ce qui donnait de l'oxyde ferrique, puis des gaz non brûlés, ce qui provoquait la réduction de cet oxyde en oxyde magnétique.

Plus tard, Bertrand améliora l'aspect final en commençant par un cuivrage léger, puis soumettant les pièces à une action gazeuse oxydante, vers 1.100°.

Les méthodes actuelles dérivent de ces travaux.

Presque toujours, on débute par un cuivrage léger permettant seul une coloration bien homogène, puis on effectue le chauffage, entre 800 et 900°, soit à feu nu, soit en moufles; le traitement en moufles est préférable; on peut opérer dans une atmosphère unique du début à la fin du chauffage, atmosphère moyennement oxydante, mais la couche est très fine et la protection plutôt illusoire; l'aspect seul est satisfaisant; — ou bien alors, on fait succéder plusieurs atmosphères, alternativement oxydantes et réductrices (air chaud et gaz non brûlé d'un gazogène par exemple); l'opération dure environ trois quarts d'heure, avec une demi-douzaine d'alternances; on termine par une passe oxydante ou bien on sort les pièces rouges du four; la protection ainsi obtenue est plus efficace.

B) *Bronzages de l'acier.* — C'est là un traitement couramment utilisé pour les pièces métalliques des armes.

L'aspect est souvent tout à fait remarquable (fusils de chasse de luxe), mais la protection contre la corrosion est faible.

On recouvre plusieurs fois les pièces de films de solutions acides; ces mélanges contiennent de l'acide chlorhydrique ou de l'acide nitrique, et des sels comme le perchlorure de fer, le bichlorure de mercure, le sulfate de cuivre, le chlorhydrate d'ammoniaque; on

laisse sécher entre chaque immersion; quelquefois on traite à l'étuve, surtout pour les derniers séchages; on avive les surfaces, après chaque traitement, par un polissage au chiffon ou à la meule d'étoffes.

Les attaques acides sont fréquemment remplacées par l'action d'huiles végétales ou de graisses plus ou moins complexes, avec les mêmes séchages, étuvages et avivages.

C) *Parkerisation.* — Nous arrivons à la méthode la dernière en date, qui convient pour tous les alliages ferreux, exception faite toutefois des aciers spéciaux inattaquables.

Il s'agit d'un traitement purement chimique par des phosphates métalliques complexes.

Les pièces, convenablement décapées, sont immergées dans un bain très chaud (une centaine de degrés) contenant de l'acide phosphorique et des phosphates de fer et de manganèse.

Pour une telle opération, les pièces sont placées dans des paniers grillagés ou dans des tonneaux ajourés, lesquels sont immergés dans des bacs (fig. 48); lorsque les pièces sont en vrac dans les tonneaux, ceux-ci sont mis mécaniquement en rotation lente. Il n'y a aucune intervention de courant électrique.

Le traitement dure de une heure à une heure et demie suivant la nature des objets; voici comment nous expliquons son processus : l'opération se fait *automatiquement* en deux temps. Premier temps : il se produit d'abord une attaque superficielle des pièces par l'acide phosphorique, avec dégagement d'hydrogène et production d'un phosphate de fer secondaire, lequel atteint rapidement la limite de saturation. Deuxième temps : l'attaque se ralentit et il se produit sur le métal un dépôt des phosphates en excès. La protection cristalline obtenue, d'une couleur gris-noir, est extrêmement adhérente puisqu'elle s'incruste sur un métal légèrement gravé par l'attaque initiale; elle est insoluble dans l'eau et très résistante à la corrosion atmosphérique normale.

On peut enfin faire subir aux pièces une ***finition*** ayant pour but, soit de leur donner une coloration différente, noire par exemple (genre ferronnerie d'art), soit d'améliorer leur résistance à la corrosion ordinaire ou de leur conférer l'immunité chimique à des agents corrosifs non usuels. Pour cela, les pièces sont placées dans des bains spéciaux à base de produits organiques de composi-

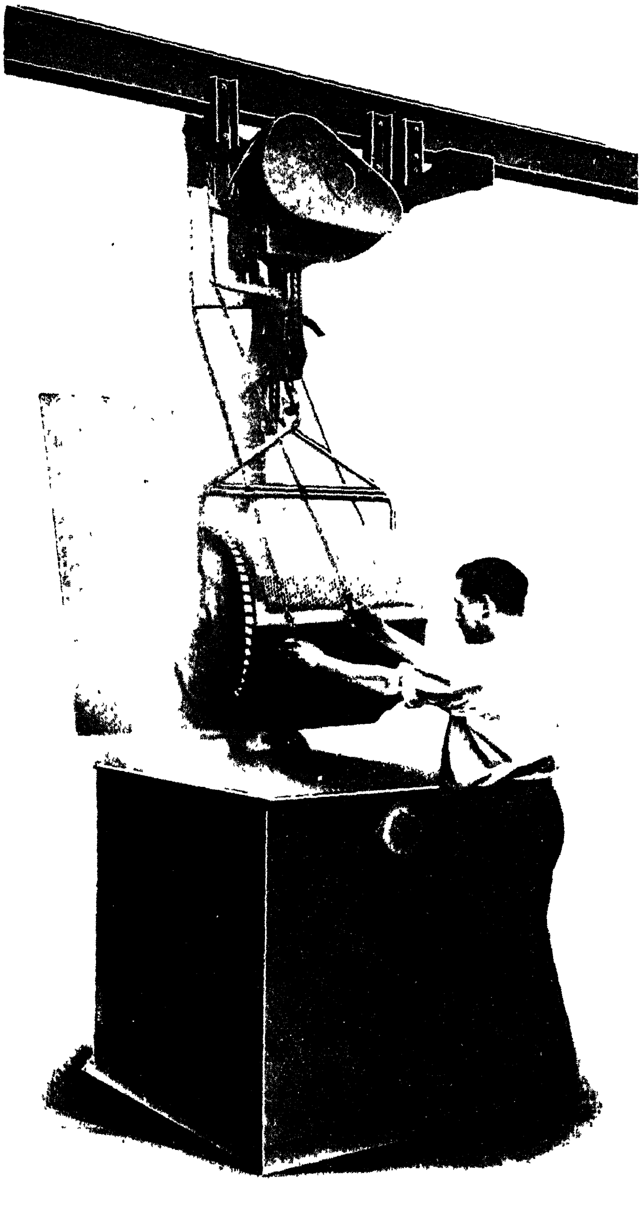


Fig. 48.
Cuve d'immersion, avec tonneau tournant, pour traitement par parkerisation.

tions diverses, ou bien peintes, ou laquées, ou vernies, ou émaillées. La protection proprement dite de phosphates complexes, base du procédé, a, en effet, en dehors de sa constitution même, la propriété de constituer une base d'absorption ou « d'accrochage » de tout premier ordre pour les recouvrements ou protections secondaires.

Après parkerisation simple, ou après finition, les pièces sont séchées; ce séchage est automatique dans le cas de grosses pièces, la chaleur interne de la masse suffisant pour cette opération; pour les petites pièces, on emploie des séchoirs ordinaires ou des essoreuses.

*Avantages de la méthode.* — En dehors des qualités de résistance chimique propre et d'absorption pour une finition, on peut signaler les avantages suivants :

Il ne s'agit pas là d'une superposition simple comme dans le cas d'une peinture : il y a d'abord attaque, en quelque sorte incrustation chimique (1), puis dépôt;

La surépaisseur produite est de l'ordre de 5 à 7 millièmes de millimètre, c'est-à-dire infime; on peut donc traiter des instruments comme les pieds à coulisse, palmers, etc.;

L'élasticité du métal est conservée (application aux ressorts) de même que l'aimantation (pièces de magnétos) et la sonorité (timbres de bicyclettes, etc.);

Le dépôt prend sur le fer, l'acier et la fonte, dans un état suffisant de propreté et sous n'importe quel état physico-chimique : acier coulé, usiné, estampé, forgé, traité, fonte malléable, etc.

Le traitement est simple et sa mise en route dans un atelier ne prête à aucune difficulté; les bains ne dégagent pas de gaz ni de vapeurs nocifs.

Enfin, nous ferons la remarque suivante qui découle directement de nos observations expérimentales :

Un début d'attaque se propage avec une vitesse très nettement plus lente sur éprouvette phosphatée que sur tout autre des protections étudiées; on sait que, sur éprouvette peinte ou laquée, ou protégée électrolytiquement, la corrosion, une fois commencée, s'insinue sous le revêtement et le soulève vite; au contraire, avec

---

(1) Il y a même une sorte de cémentation, au sens scientifique du mot; une coupe micrographique décèle en effet une pénétration intercristalline sur une profondeur de 1 à 2/100 millimètre.

le nouveau mode de traitement, la propagation est incontestablement freinée; nous croyons qu'il faut voir là, non seulement un effet de l'excellent « accrochage » déjà signalé, mais aussi une absence d'activation galvanique entre les deux produits en présence.

*Limites du procédé.* — Par contre, il faut, comme en toutes choses, ne pas chercher des applications là où, *a priori*, l'emploi est impossible, par exemple :

Les recouvrements métalliques par électrolyse ne prennent pas ou prennent mal sur la couche parkerisée;

Les oxydations à température élevée percent la protection; la méthode est valable jusqu'aux environs de 600 à 700°;

La protection ne prend que sur les alliages ferreux, et non sur les alliages de cuivre, les alliages légers et ultra-légers, les antifrictions, etc. Notons, en passant, que le cuivrage des pièces en alliages ferreux permettra d'effectuer des « réserves », comme dans la cémentation par le carbone.

Dans le même ordre d'idées, comme ce traitement implique une attaque initiale, il ne peut convenir pour perfectionner la tenue à la corrosion des aciers spéciaux tels que les aciers à haute teneur en chrome ou en nickel-chrome.

# TITRE X

# CLASSIFICATION ET ÉTUDE DES ACIERS

## CHAPITRE XX

## DISCUSSION RELATIVE A LA CLASSIFICATION

On peut rechercher un mode de classification englobant tous les aciers, qu'ils soient *ordinaires* ou qu'ils soient *spéciaux*.

1° Classification fondée sur la « structure décelée par la micrographie ».

Des diagrammes peuvent résumer cette étude micrographique en indiquant en fonction de la teneur en carbone et en constituants spéciaux la structure des aciers à différents états de traitements thermiques.

Une pareille classification n'est pas sans présenter de grosses difficultés, et la précision qu'elle comporte est encore à l'heure actuelle aléatoire.

La micrographie constitue un adjuvant précieux pour toute autre classification qu'elle complète heureusement.

Mais il semble qu'à elle seule elle conduirait à des divisions trop larges, trop générales, souvent imprécises et peu industrielles.

2° Classification fondée sur la position des points critiques en fonction de la vitesse de refroidissement.

C'est cette classification qu'a adoptée Grenet (1).

(1) *Trempe, Recuit, Cémentation et conditions d'emploi des aciers* (Béranger, Paris, 1918).

Les transformations sont représentées au moyen des courbes de dilatation à l'échauffement (marquées par un trait pointillé) et au refroidissement (marquées par un trait plein). Ces courbes sont schématiques, se contentant de marquer le changement d'allure indiquant le commencement et la fin de la transformation.

Notons que l'hystérésis du point de transformation au refroidissement dépend de trois causes :

1° Température maxima atteinte;

2° Temps pendant lequel cette température a été maintenue;

3° Vitesse de refroidissement.

On élimine les variations dues aux deux premières causes en les rendant constantes.

La vitesse de refroidissement doit seule être précisée.

Grenet divise les aciers en quatre groupes :

*Premier groupe.* — Aciers dont la température de transformation au refroidissement lent (1) est sensiblement la même que la température de transformation à l'échauffement (Voir diagramme, fig. 49).

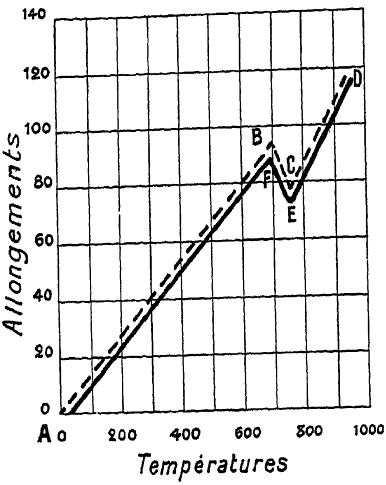
Rentrent dans ce groupe les aciers ordinaires au carbone (aciers 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16) du tableau Standard de l'Aéronautique.

Aciers au manganèse (1,50 de Mn);
Aciers mangano-siliceux;
Aciers au nickel de cémentation (21 du tableau Standard);
Acier au nickel-chrome de cémentation (31 du tableau Standard);
Acier nickel-chrome nuance demi-dur et dur (Nos 32 et 33 du tableau Standard);
Aciers pour roulements (N° 51 du tableau Standard).

*Deuxième groupe.* — Aciers dont la température de transformation au refroidissement très lent (1) est sensiblement la même qu'à l'échauffement et dont la température de transformation au refroidissement moyennement lent (1) est beaucoup plus basse qu'à l'échauffement (Voir diagramme, fig. 50 et 51).

Rentrent dans ce groupe les aciers chrome-tungstène, chrome-molybdène, vanadium, ou d'une façon générale les aciers à outils (Aciers n° 62 du tableau Standard).

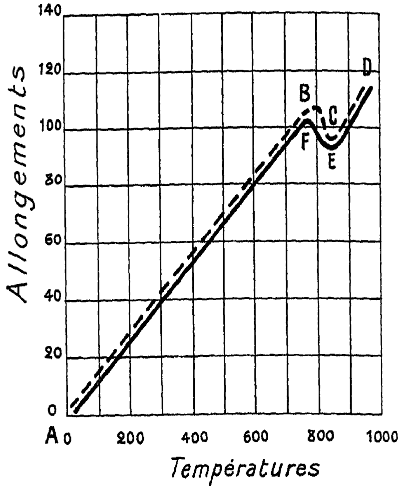
(1) Voir la définition des vitesses de refroidissement, titre VIII, chapitre XII.




**ACIERS DU 1er GROUPE**

Courbes observables (*Grenet*)

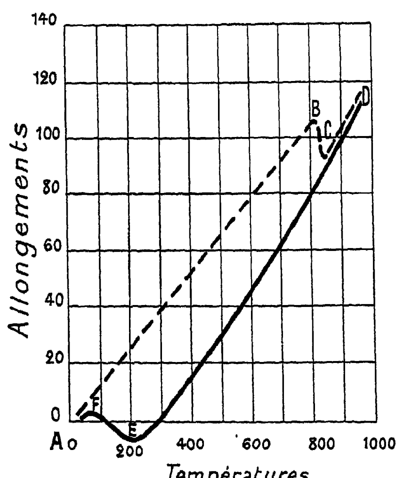
Fig. 49




**ACIERS DU 2ème GROUPE**

Refroidissement très lent (*Grenet*)

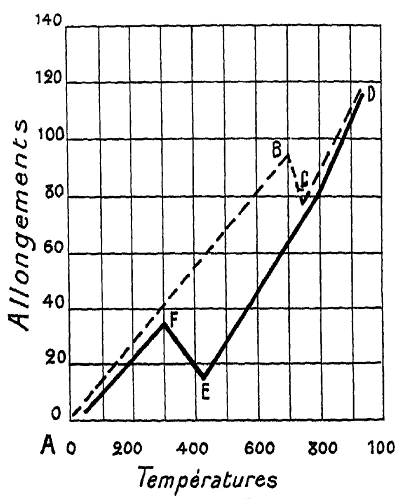
Fig. 50.




**ACIERS DU 2ème GROUPE**

Refroidissement moyennement lent (*Grenet*)

Fig. 51.




**ACIERS DU 3ème GROUPE**

(*Grenet*)

Fig. 52.

*Troisième groupe.* — Aciers dont la température de transformation au refroidissement, même très lent, est très différente de la

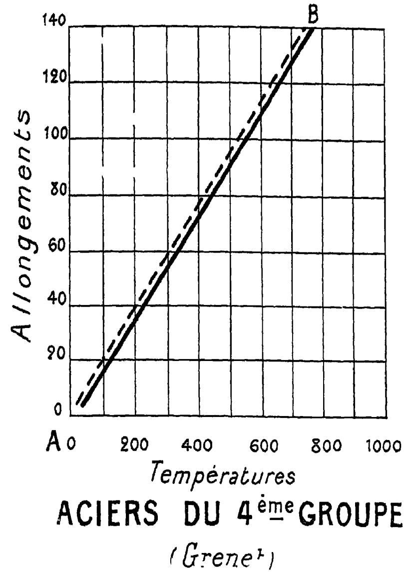



Fig. 53.

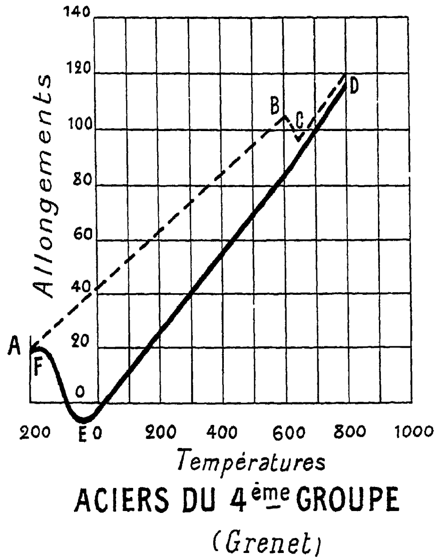



Fig. 54.

température de transformation à l'échauffement (Voir diagramme, fig. 52).

Rentrent dans ce groupe les aciers nickel-chrome pour lesquels

$$C + Ni + Cr \geqslant 5$$

(Aciers n° 36 du tableau Standard)

*Quatrième groupe.* — Aciers dont la température de transformation au refroidissement est au-dessous de la température ordinaire (Voir diagramme, fig. 53 et 54) (1).

Rentrent dans ce groupe les aciers à haute teneur en nickel et en manganèse. Aciers à 30-35 % de nickel, 2 % de Cr (N° 35 du tableau Standard).

Acier Hadfield à 12 % de manganèse, 1 % de C.

---

(1) Voir la définition des vitesses de refroidissement, titre VIII, chapitre XII.

Pour certains des aciers de ce groupe, un refroidissement inférieur à la température ordinaire peut amener la transformation.

Pour d'autres, il est impossible de provoquer la transformation, quel que soit le refroidissement.

Cette classification se référant aux traitements thermiques des aciers qui constituent une pratique essentiellement industrielle présente sans contredit un grand intérêt.

Nous ne l'adopterons pas néanmoins, mais utiliserons pour l'étude des aciers les propriétés spéciales invoquées par elle.

En résumé, en faisant appel pour l'étude des aciers à l'analyse micrographique et à l'étude des points critiques (y compris leur hystérésis), nous classerons les aciers conformément aux principes posés par la Commission permanente de Standardisation française (Unification des Produits métallurgiques), le 10 juin 1919, à savoir :

1° *Aciers ordinaires au carbone* ou *primaires*, c'est-à-dire ne contenant pas d'éléments étrangers au carbone en quantité suffisante pour modifier sensiblement leurs caractéristiques.

Ces aciers primaires ne renferment, en dehors du carbone, que les proportions suivantes de divers éléments :

$$\text{Mn} \leqslant 1\% \qquad \text{Si} \leqslant 1\%$$
$$\text{S} \leqslant 0{,}1\% \qquad \text{P} \leqslant 0{,}1\%$$
$$\text{Ni, Cr, Cu} \leqslant 0{,}2\%$$

Les aciers primaires sont classés d'après leur teneur en carbone.

2° *Aciers spéciaux*, c'est-à-dire possédant un ou plusieurs éléments étrangers au système fer-carbone, à savoir manganèse, nickel, chrome, tungstène, vanadium, molybdène, silicium, etc. en quantité suffisante pour que les caractéristiques qu'ils auraient, s'ils ne renfermaient que du carbone, en soient sensiblement modifiées.

Les aciers spéciaux seront groupés en *aciers binaires* et *aciers ternaires*. Les *aciers binaires* contiennent un des éléments précédemment énumérés à dose plus forte que celle indiquée pour les aciers primaires.

Les *aciers ternaires* contiennent deux de ces éléments à dose plus élevée que celles indiquées pour les aciers primaires.

# CHAPITRE XXI

# ACIERS ORDINAIRES AU CARBONE OU ACIERS PRIMAIRES

## Caractéristiques à froid.

§ 1. Classification des aciers ordinaires d'après la résistance et la teneur en carbone. — Les aciers ordinaires au carbone se divisent suivant *leur teneur en carbone :*

| | | |
|---|---|---|
| Aciers extra-doux . . | C varie de 0,05 à 0,150<br>R varie de 34 à 40 kg | Nos 10 et 11<br>du tableau Standard. |
| Aciers doux . . . . . | C varie de 0,150 à 0,300<br>R varie de 40 à 48 kg | No 12<br>du tableau Standard. |
| Aciers mi-doux. . . . | C varie de 0,300 à 0,400<br>R varie de 48 à 5 kg | No 13<br>du tableau Standard. |
| Aciers demi-durs. . . | C varie de 0,400 à 0,600<br>R varie de 55 à 65 kg | No 14<br>du tableau Standard. |
| Aciers durs . . . . . | C varie de 0,600 à 0,700<br>R varie de 65 à 75 kg | No 15<br>du tableau Standard. |
| Aciers extra-durs. . . | C varie de 0,700 à 1,2<br>R $>$ 75 kg | No 16<br>du tableau Standard. |
| Fontes . . . . . . . | C $>$ 1,2 | |

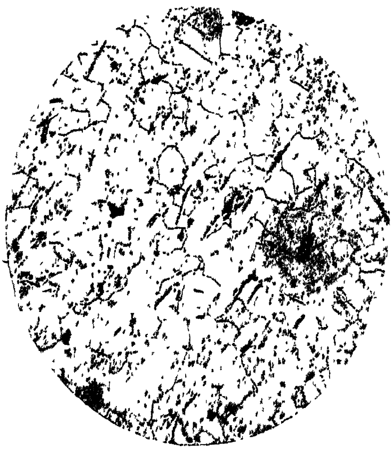
Se reporter au diagramme de Roozeboom.

§ 2. Analyse micrographique. — Nous avons établi une gamme micrographique (Voir planches X, XI et XII) d'aciers ordinaires au carbone *recuits*, dressée d'après des échantillons analysés.

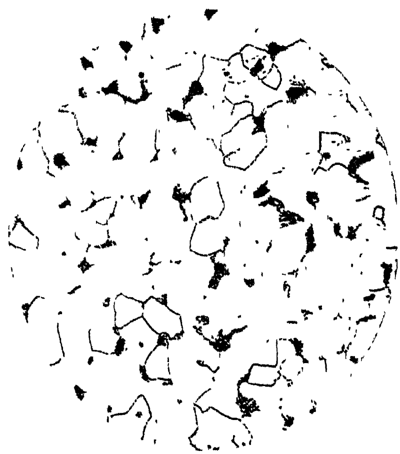
Elle permet de suivre, d'après la teneur en carbone, les variations dans les constituants.

L'aspect micrographique d'un métal étudié, après attaque faite dans les conditions précédemment indiquées, donne de précieuses

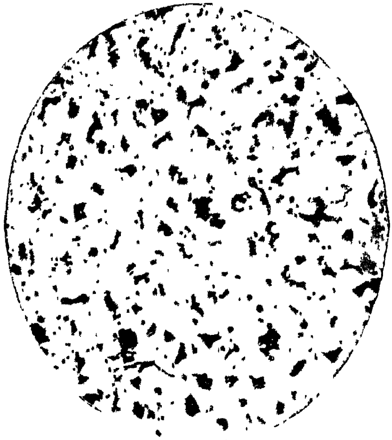
## GAMME DES ACIERS ORDINAIRES AU CARBONE



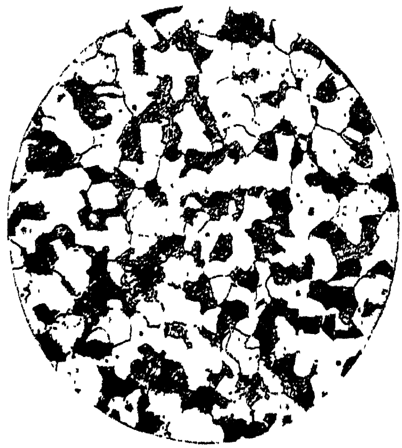
1
Fer.



2
C = 0,10.



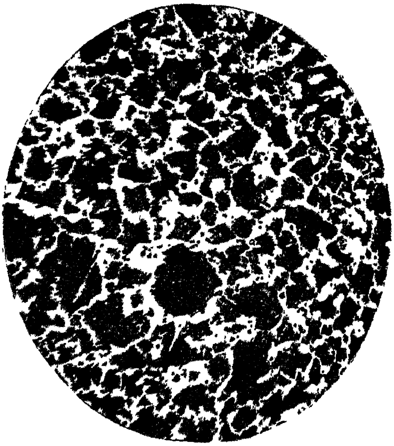
3
C = 0,15.



4
C = 0,33.

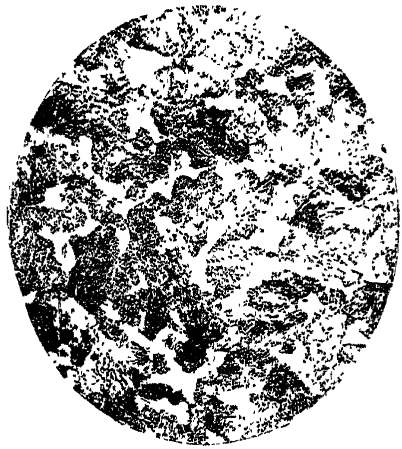
PLANCHE X

# GAMME DES ACIERS ORDINAIRES AU CARBONE



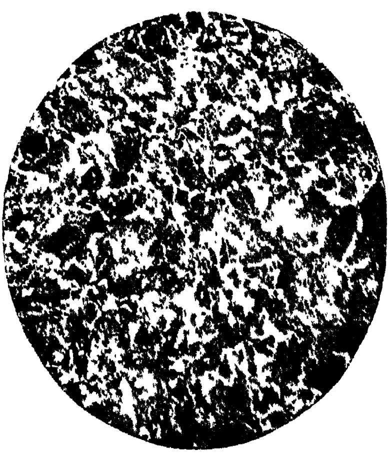
1

C = 0,44



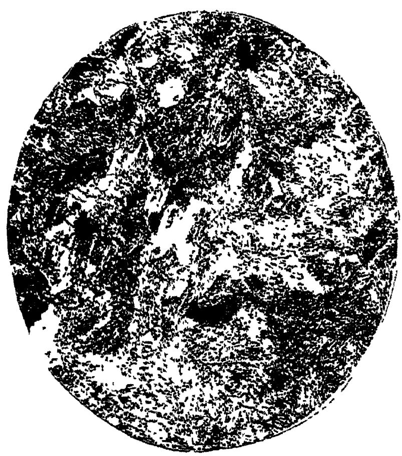
2

C = 0,54



3

C = 0,60



4

C = 0,64

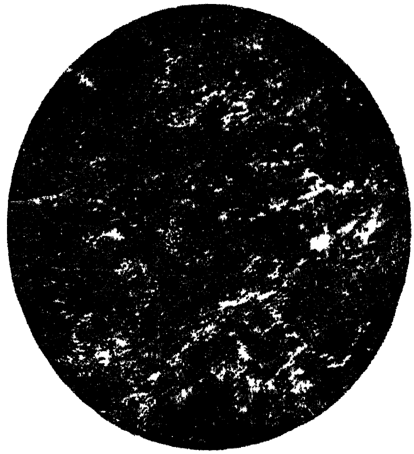
PLANCHE XI

## GAMME DES ACIERS ORDINAIRES AU CARBONE



1

C = 0,77.



2

C = 0,9 (eutectique).



3

C = 1,2.



4

C = 1.950.

Planche XII

indications sur la nuance du métal en question, par comparaison avec la gamme type.

Le procédé est rapide.

C'est un point de départ pour les traitements thermiques.

§ 3. Caractéristiques mécaniques. — Ces caractéristiques E, R, A, Δ et ρ sont résumées dans le tableau Standard n° 1.

§ 4. Coefficients de proportionnalité. — Nous avons recherché les coefficients de proportionnalité pour les *aciers recuits* et pour les aciers *trempés* (1).

Ces coefficients nous permettent, d'après la relation $R = K \Delta$, d'avoir R, si l'on connaît Δ.

Après un très grand nombre d'essais, nous avons trouvé, pour es différentes nuances d'acier, les *coefficients de proportionnalité* K suivants :

**a) Aciers recuits.**

1° *Essais perpendiculaires au sens du laminage.*

| | |
|---|---|
| Aciers extra-doux | 0,360 |
| Aciers doux | 0,355 |
| Aciers mi-doux | 0,354 |
| Aciers demi-durs | 0,353 |
| Aciers durs | 0,349 |
| Aciers extra-durs | 0,345 |

2° *Essais parallèles au sens du laminage*

| | |
|---|---|
| Aciers extra-doux | 0,345 |
| Aciers doux | 0,342 |
| Aciers mi-doux | 0,340 |
| Aciers demi-durs | 0,337 |
| Aciers durs | 0,321 |

En adoptant, suivant le cas, les coefficients de l'une ou l'autre série, on aura la résistance à la traction, *dans le sens longitudinal.*

b) *Aciers trempés et revenus.* — Les aciers en question, sauf les aciers extrêmes, *extra-durs* et *extra-doux*, ont été trempés et soumis,

(1) « Recherches sur la dureté et la fragilité des aciers » (*Revue d'Artillerie*). Capitaine Grard .

après trempe, à des revenus et recuits variant depuis 100° jusqu'à 1.200°.

Nous avons trouvé les coefficients de proportionnalité suivants :

1° Acier doux trempé, ayant subi des revenus entre 500° et 700° :

0,346

2° Acier demi-dur trempé, ayant subi un revenu compris entre 500° et 650° :

0,344

3° Acier dur trempé, ayant subi un revenu compris entre 500° et 650° :

0,318

§ 4. Variation des propriétés mécaniques des aciers au carbone (R, E, A, Δ et ρ) avec les traitements thermiques (1). — Nous avons trempé un grand nombre d'aciers des nuances suivantes :

Aciers doux,
Aciers demi-durs,
Aciers durs.

Puis nous avons soumis ces aciers à des revenus croissant jusqu'à la température de *recuit.*

Nous avons déterminé les caractéristiques

R, E, A, Δ et ρ

à tous ces états de traitement thermique et avons établi les courbes (fig. 1, 2 (2), et 3 planche encartée ci-contre).

Nous avons distingué ainsi quatre zones suivant les revenus.

*Première zone.* — Les résistances augmentent avec les revenus, puis restent stationnaires.

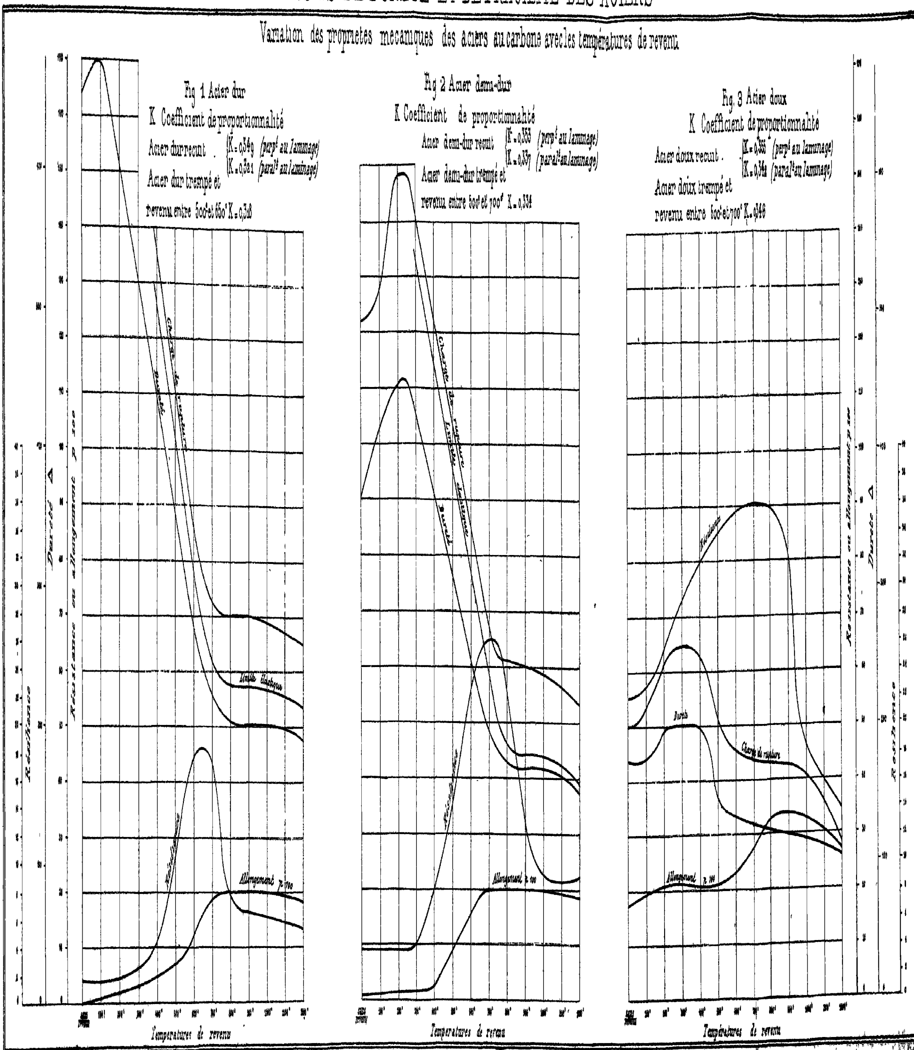
---

(1) Dans tous nos essais, nous avons toujours déterminé les résiliences avec petites éprouvettes Charpy entaille Mesnager sur mouton-pendule Charpy de 30 kgm.

(2) Courbes prises dans le fascicule « Dureté et Fragilité des aciers », de l'auteur (Capitaine Grard).

# ESSAIS DE DURETÉ ET DE FRAGILITÉ DES ACIERS

Variation des propriétés mécaniques des aciers au carbone avec les températures de revenu



*Deuxième zone* — Les résistances vont en diminuant, tandis que les allongements augmentent

*Troisième zone* — Les propriétés sont stationnaires, c'est la zone du recuit complet

*Quatrième zone* — Les propriétés mécaniques diminuent C'est la *zone de fléchissement*

Le tableau ci-après (Voir p 162) indique, par nuance d'acier, les limites des zones ci-dessus mentionnées, et les valeurs de Δ et de ρ afférentes à chaque zone

§ 5 Application pratique des courbes relatives aux propriétés mécaniques — Les courbes de dureté ont une application intéressante pour la détermination du traitement thermique subi par un acier, détermination très difficile, dans le cas des revenus, par la micrographie seule

La micrographie décèle, en effet, pour les aciers trempés et revenus, la présence d'un constituant spécial auquel le Congrès de Copenhague avait donné le nom d'osmondite, confondant en lui la troostite et la sorbite

Il est difficile de déduire des variations d'aspect de ce constituant

1° La nuance de l'acier,

2° La température du revenu

Or, ces recherches peuvent se faire comme il suit

1° *Recherche de la nuance* — Faire recuire un échantillon de l'acier étudié dans les conditions indiquées au chapitre XI

Micrographier l'échantillon et déduire de l'aspect perlitique le pourcentage de carbone, c'est-à-dire la nuance de l'acier en question

On se trouve, par exemple, en présence d'un acier demi-dur

2° *Recherche de la température de revenu* — Prendre un deuxième échantillon du même métal et le soumettre à un essai à la bille pour déterminer le nombre de dureté, soit par exemple 300.

Consulter les courbes de la figure 2 de la planche ci-contre, relatives à l'acier demi-dur et voir le revenu correspondant au nombre 300, soit revenu 500°.

**TABLEAU 5 — Relation entre la dureté et la résilience des aciers ordinaires**

| ZONES | ACIER DUR — Acier recuit à 750° et refroidi lentement { Δ = 185 ; ρ = 10 } — Traitement thermique. Revenu après trempe à 25° au-dessus de $A_3$ | Nombre de dureté moyen Δ | Résilience moyenne ρ | ACIER DEMI-DUR — Acier recuit à 800° et refroidi lentement { Δ = 165 ; ρ = 15 } — Traitement thermique. Revenu après trempe à 25° au-dessus de $A_3$ | Nombre de dureté moyen Δ | Résilience moyenne ρ | ACIER DOUX — Acier recuit à 825° et refroidi à l'air { Δ = 120 ; ρ = 25 } — Traitement thermique. Revenu après trempe à 25° au-dessus de $A_3$ | Nombre de dureté moyen Δ | Résilience moyenne ρ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1re zone | Sans revenu à revenu 100° | 600 à 650 | 0,5 à 1,5 | Sans revenu à revenu 250° | 360 à 450 | 4 | Sans revenu à revenu 400° | 180 à 200 | 20 à 30 |
| 2e zone . . . . | Revenu 200°<br>— 300°<br>— 400°<br>— 500°<br>— 600°<br>— 700° | 600<br>520<br>440<br>350<br>260<br>220 | 2<br>3<br>4<br>10<br>16<br>16 | Revenu 300°<br>— 400°<br>— 500°<br>— 600°<br>— 700° | 420<br>360<br>320<br>240<br>200 | 4<br>8<br>12<br>22<br>26 | Revenu 400°<br>— 500°<br>— 600°<br>— 700°<br>— 800° | 200<br>140<br>130<br>125<br>120 | 32<br>34<br>35<br>35<br>36 |
| 3e zone. . . . . | Recuit 750°<br>— 800°<br>— 850° | 210<br>200<br>200 | 12<br>8<br>7 | Recuit 800°<br>— 900° | 165<br>165 | 22<br>12 | Recuit 825°<br>— 900°<br>— 925° | 120<br>120<br>120 | 34<br>32<br>28 |
| 4e zone . . . | Recuit 900°<br>— 1000°<br>— 1100°<br>— 1200° | 200<br>200<br>195<br>190 | 6,5<br>6<br>5,5<br>5 | Recuit 1000°<br>— 1100°<br>— 1200° | 175<br>170<br>155 | 4<br>[illegible]<br>6 | Recuit 1000°<br>— 1100°<br>— 1200° | 115<br>110<br>100 | 15<br>18<br>14 |

Les propriétés mécaniques correspondantes sont approximativement les suivantes

$$R = 105$$
$$A = 8 \text{ à } 10$$
$$\rho = 12 \text{ à } 14$$

Ce moyen, qui ne vise pas à la précision, étant donné que les courbes correspondent à des moyennes, donne, dans la pratique, une première indication très utile

CHAPITRE XXII

# ACIERS SPÉCIAUX

---

## Caractéristiques à froid.

L'obligation, d'une part, de faire coexister une grande résilience et une grande dureté ou, plus généralement, de réunir en un seul métal des caractéristiques habituellement contradictoires, et, d'autre part, de demander comme en aéronautique, sous une masse aussi réduite que possible, des qualités de résistance suffisante, conduit naturellement à abandonner les *aciers ordinaires* pour les *aciers spéciaux*

Nous allons résumer, *uniquement au point de vue pratique et industriel*, les propriétés des aciers spéciaux

Nous grouperons ces aciers comme il suit

Dans le paragraphe A, les *aciers binaires*, à savoir

1° Aciers au manganèse,
2° Aciers au nickel,
3° Aciers au chrome,
4° Aciers au tungstène,
5° Aciers au silicium;
6° Aciers divers

Dans le paragraphe B, les *aciers ternaires*, à savoir :

1° Aciers nickel-chrome,
2° Aciers chrome-tungstène

Puis nous indiquerons les applications de ces aciers pour l'aviation en faisant intervenir, au chapitre XXIII, la notion très importante de *température de travail.*

**Considérations générales.**

Si le métal d'addition ne forme avec les constituants de l'alliage, ni combinaison, ni solution solide, il créera une hétérogénéité qui nuira à la qualité

Le corps d'addition choisi devra entrer en solution solide dans un ou plusieurs constituants de l'alliage

Il y apportera des modifications dans les propriétés mécaniques ou physico-chimiques, ainsi que dans les températures d'apparition ou de disparition des points de transformation, et par voie de conséquence dans les diagrammes d'equilibre

Pour une vitesse de refroidissement donnée, le rejet des points de transformation aux temperatures basses diminue la quantite de la transformation et conduit aux états martensitiques ou austenique (trempe et hypertrempe)

Le nickel et le manganese produisent ces effets

Le relevement des points de transformation conduit aux resultats inverses Il accentue les effets du recuit

Le tungstene, l'aluminium, le molybdène et le silicium produisent ce relèvement

## A ACIERS BINAIRES

§ 1 ACIERS AU MANGANÈSE - Suivant la teneur en carbone et en manganèse, conformément au diagramme (fig 55), les aciers au manganèse se divisent en

*Aciers perlitiques* (ayant la texture de l'acier ordinaire recuit)

*Aciers martensitiques* (ayant la texture de l'acier ordinaire trempé)

*Aciers polyédriques ou a fer* γ (ayant la texture du fer)

*Caractère commun* — Abaissement des points critiques

Pour un acier renfermant de 0,3 à 0,4 % de carbone, la température du point critique passe de 750 à 0 lorsque le manganèse varie de 0 à 8

Le manganèse est un retardateur des transformations Il accentue donc les effets de la trempe

*Aciers perlitiques* — Peu utilisés Le manganèse à une teneur inférieure à 2 % augmente R et Δ sans trop diminuer A

*Aciers martensitiques* — Inutilisables parce que A et ρ sont presque nuls

*Aciers polyédriques* — Ils présentent une grande résistance au

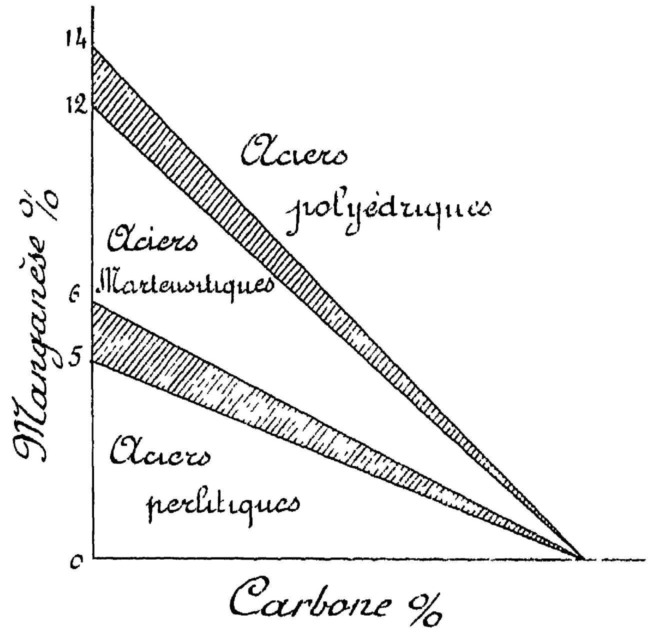



Fig 55

choc et à l'usure Les seuls aciers industriels sont les aciers Hadfield ayant comme composition

C — 1 à 1,5
Mn — environ 12%

Le forgeage de cet acier s'exécute vers 900°; il *écrouit* fortement le métal.

L'état doux, après forgeage, est obtenu par la trempe, qui donne :

R = 100 kg    A = 50%    E = 35 kg.

L'état dur est obtenu par recuit. On obtient à cet état une très

grande resistance a l'usure que la dureté Δ ne met pas en évidence (important à noter pour constater que la dureté minéralogique n'est pas en relation directe avec la résistance a l'usure)

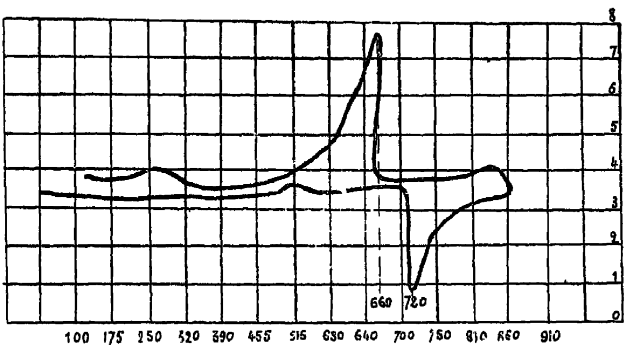
L'usinage est presque impossible Aussi les pièces doivent-elles être employées brutes de moulage et de laminage

**Étude d'un acier au manganèse perlitique**

Analyse chimique { C = 0,69 ; Mn = 1,6 ; Si = 0,48 }

Analyse micrographique (Voir photogrammes 1 et 2, planche XIII )

**Courbe des points critiques d'un acier au manganese perlitique**




| | |
|---|---|
| Point critique à l'échauffement | 720° |
| Point critique au refroidissement | 660 |
| Température de trempe | 745 |

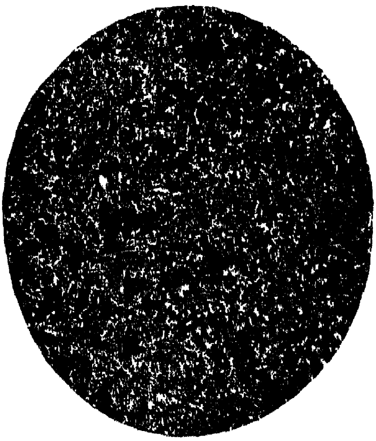
Fig 56

La grande dureté de cet acier ne peut être associée qu'à des résiliences insignifiantes qui en interdisent l'emploi lorsque la pièce d'acier est soumise a des trépidations ou des chocs (ferrures d'appareil d'aviation, pièces de moteur)

§ 2 Aciers au nickel — Il y a trois séries d'aciers au nickel suivant la teneur en carbone et en nickel, conformément au diagramme (fig 58) Ces aciers ont été étudiés d'une façon très approfondie par M Guillet Il les a divisés comme il suit

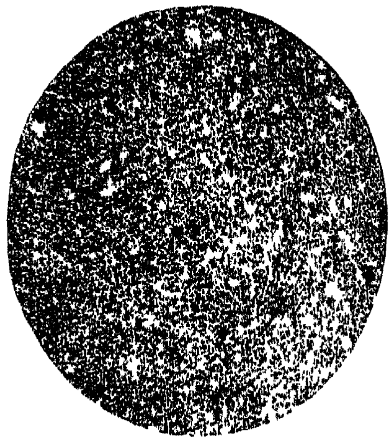
1° Aciers perlitiques
2° Aciers martensitiques,
3° Aciers polyédriques

## ACIER AU MANGANÈSE PERLITIQUE



1

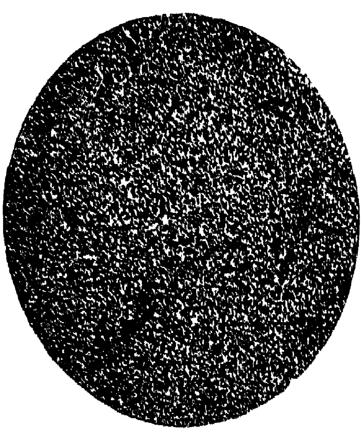
Recuit à 750°



2

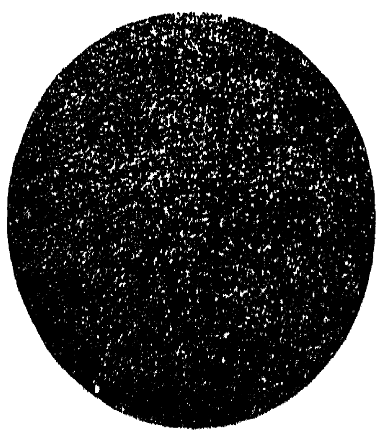
Trempé à l'eau à 745°. Revenu 600°

## ACIER AU NICKEL PERLITIQUE



3

Trempé à l'eau à 760°. Revenu 600°.



5

Trempé à l'eau à 750°. Sans revenu.

PLANCHE XIII

## Caractère commun.

*Abaissement des points critiques* — Les points critiques s'abaissent au fur et à mesure que l'on augmente le nickel, mais d'une façon moindre qu'avec le manganèse Cet abaissement explique l'aspect martensitique au-dessus de 10 % de Ni pour un acier peu carburé

Avec les aciers à 25 % de nickel, il n'y a pas de transformation

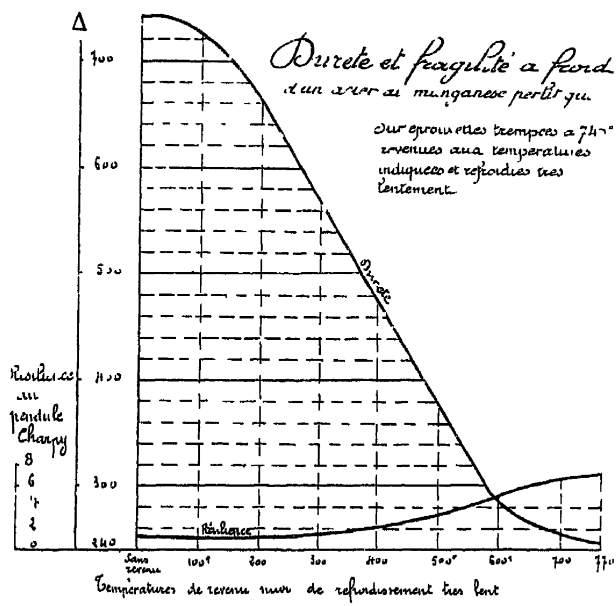



Fig 57

appréciable au refroidissement Le fer reste à l'état γ, c'est-a-dire *non magnétique* à la température ordinaire Il retrouve son magnétisme à — 50°, le conserve à la température ordinaire et ne le perd que par un nouveau recuit. On a ainsi l'exemple d'un acier qui, à la température ordinaire, peut être magnétique ou non magnétique

*Écrouissage.* — Les aciers au nickel sont tous très sensibles à l'écrouissage. En conséquence, le travail à froid procure des diminutions très sensibles d'allongement et d'homogénéité des pièces.

*Aciers perlitiques ou à basse teneur en nickel.* — Le nickel augmente

R, E, A et ρ

Ceci permet de faire coexister, avec un R respectable, un *allon-*

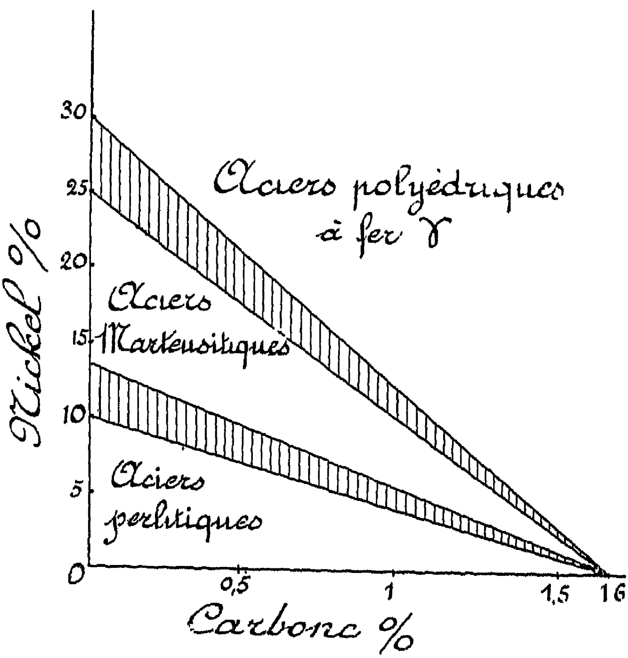



Fig. 58.

*gement important* et une résilience intéressante qu'un acier au carbone de même R ne pourrait donner.

Ex. Acier au Ni à 0,25 C et 4 Ni donne

R = 74 E = 44 A = 29 ρ = 30

Avec 0,25 C sans Ni

R = 48    E = 25    A = 25    ρ = 20

Pour avoir R = 74 sans nickel les autres caractéristiques seraient

E = 40    A = 8    ρ = 10

L'intérêt est donc évident

*État doux* - Obtenu par recuit (methode générale)

*État dur* Trempe dont l'énergie dépend de C + Ni, moins délicate qu'avec C seul, car A étant plus grand, les tapures sont moins à craindre

*Usage* Les aciers au nickel perlitiques de 2 a 3 % de nickel sont les *aciers types de cémentation*

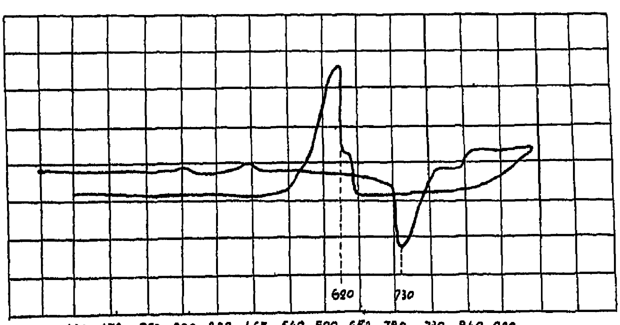
Pour le traitement de ces aciers, se reporter a ce qui a éte dit au chapitre XVI

**Étude d'un acier au nickel perlitique**

Analyse chimique { C = 0,26 ; Ni = 3,05 ; Mn = 0,47 ; Si = 0,19

Analyse micrographique (Voir photogrammes 3 et 4, planche XIII)

**Courbe des points critiques d'un acier au nickel perlitique**




| | |
|---|---|
| Point critique à l'échauffement | 730° |
| Point critique au refroidissement | 620 |
| Température de trempe | 760 |

Fig. 59

On voit que l'on peut trouver un revenu permettant d'obtenir une résilience suffisante avec une dureté à froid moyenne. À 600° on a

$$\rho = 8 \qquad \Delta = 100$$

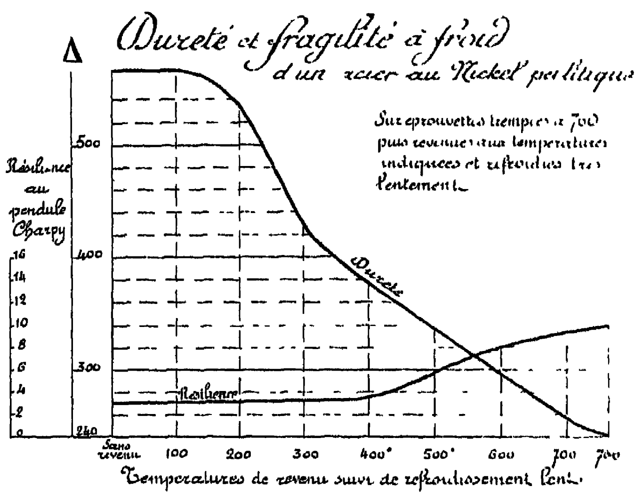



Fig. 60

Le diagramme ci-dessus permettra de fixer ce revenu suivant les qualités recherchées.

*Aciers martensitiques ou à moyenne teneur en* Ni. — R et E sont élevés, mais A très faible.

Ex. :

$$C = 0,12 \qquad Ni = 20$$

donne

$$R = 120 \qquad E = 80 \qquad A = 5$$

*État doux et état dur.* — Il faut distinguer deux catégories d'aciers au nickel martensitiques.

1° *Type des aciers à 15 % de nickel.* — Cette catégorie, qui se rapproche de la limite des aciers perlitiques, est légèrement adoucie

par le recuit et legèrement durcie par la trempe La trempe augmente de quelques kilos la charge de rupture obtenue après recuit

2° *Type des aciers à 25 % de nickel* — Cette catégorie se conduit d'une façon inverse de la précédente

Le recuit donne un léger durcissement, la trempe un léger adoucissement

Ce phénomène s'explique aisément par le retard des transformations au refroidissement

*Usage* — Étant donné leurs difficultés d'usinage, ces aciers ne s'emploient pratiquement plus

*Aciers polyedriques ou à haute teneur en nickel* — R et E faibles, mais A très grand, ρ très grand Très peu *oxydables* Grande résistance a l'usure

1° *Type de 30 a 32 % de nickel* — L'acier de 30 à 32 % de nickel a les caractéristiques moyennes suivantes

$$R = 55 \qquad E = 32 \qquad A = 32$$

Le grand allongement permet de beaux étirages

*État doux* - Un léger adoucissement est obtenu par la trempe. R diminue de 20 %, E de 10 %, A augmente de 10 %

*État dur* - Un léger durcissement est obtenu par recuit

*Usage* - Cet acier est employé pour toutes les pièces qui craignent l'oxydation ou celles qui exigent une grande résilience

*Utilisé avantageusement pour les soupapes de moteurs, qui travaillent à des températures élevées, les qualités énoncées se maintenant à un assez haut degré de l'échelle thermique*

Utilisé pour des tubes sans soudure, étant donné l'étirage remarquable

*Difficile à travailler*

2° *Types polyédriques utilisés en considération de la dilatation* — La courbe (fig 61) montre les variations des coefficients de dilatation δ avec la teneur en nickel pour les températures de 0° à 50°.

Le minimum de dilatation correspond à 35 % de nickel

*a*) Type 36 % de nickel

Guillaume a choisi la composition suivante

$$C = 0{,}200 \text{ à } 0{,}300$$
$$Ni = 36$$

pour son acier *Invar* dont le coefficient de dilatation est négligeable entre 0° et 350 °

L'invar est utilisé pour les tiges de pendule, les instruments de précision, la chronométrie

*b*) Type 46 % de nickel et 0,15 de carbone, ayant le même coef-

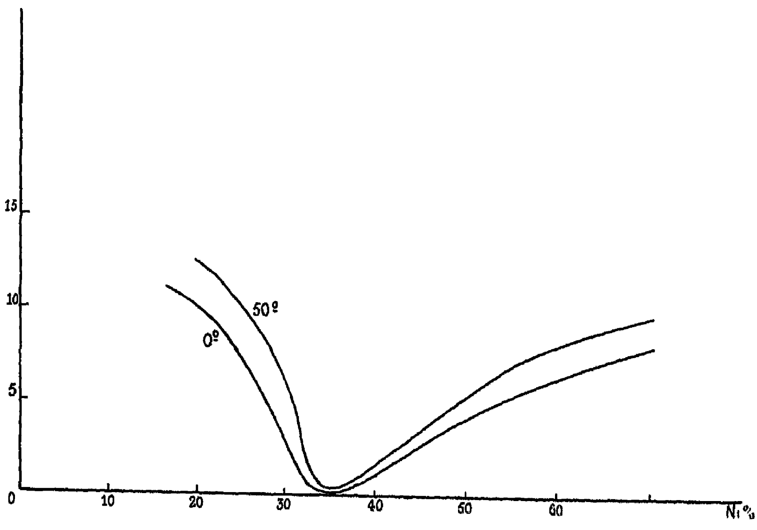



Fig 61

ficient de dilatation que le verre C'est le *platinite* ou *dilver* employé pour les lampes à incandescence

*c*) Type 58 % de nickel qui a le même coefficient de dilatation que le fer et est assez inoxydable, employé pour les règles étalon servant à la graduation d'instruments en fer.

*Aciers inoxydables.* — Nous verrons comment intervient le nickel dans la fabrication des aciers inoxydables (Aciers ternaires B, § 5).

§ 3. ACIERS AU CHROME. — Il y a trois séries d'aciers au chrome suivant la teneur en carbone et en chrome, conformément au diagramme (fig. 62).

1° Aciers perlitiques,
2° Aciers martensitiques,
3° Aciers à carbure double.

Nous ne nous occuperons pas des aciers *martensitiques*.

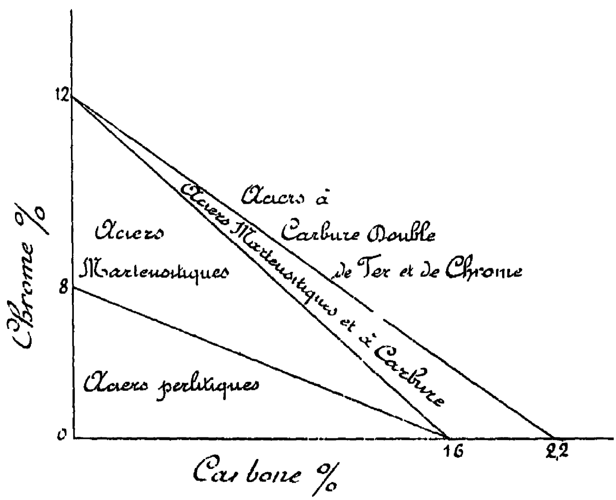



Fig. 62.

*Aciers perlitiques.* — Le chrome augmente R, et diminue ρ. La proportion maximum de chrome est de 2 à 2,5 %.

*État doux.* — Recuit.

*État dur.* — Trempe dont les effets sont augmentés par la présence du chrome et qui fait naître des dangers de tapure.

*Usage.* — Pièces devant présenter une grande dureté, mais ne travaillant pas au choc. Confection des roulements à billes.

C = 1 à 3 — Cr = 3 à 4 — outils — limes C = 0,75 — Cr = 2.

*Aciers à carbure double.* — A signaler un acier utilisé pendant la

guerre, en France et en Angleterre, pour la fabrication des soupapes d'échappement de moteurs d'aviation La spécification anglaise donne comme composition

$$C = 0,2 \text{ à } 0,4$$
$$Cr = 11,5 \text{ à } 14$$

*Aciers inoxydables* – Nous verrons au paragraphe B comment intervient le chrome dans la fabrication des aciers inoxydables

§ 4 Aciers au tungstène Il y a deux séries d'aciers au tungstène suivant la teneur en carbone et en tungstène, conformément au diagramme (fig. 63)

1° Aciers perlitiques,
2° Aciers à carbure double

*Caractère commun* — Le tungstène est un retardateur des transformations au refroidissement Il élève un peu les points de transformation à l'échauffement

1° *Aciers perlitiques* – Le tungstène augmente

R, E,

laisse ρ stationnaire, diminue légèrement A

*État doux* — Recuit

*État dur* — Trempe en chauffant à une température plus élevée que pour les aciers ordinaires au carbone.

*Usage* — *Ressorts*

$$C = 0,500$$
$$Tu = 0,600$$

donnant

$R = 80$ $E = 60$ $A\% = 14$

Après trempe à 850° et revenu à 500°

$R = 140$ $E = 100$ $A\% = 8$

2° *Aciers à carbure double* — Avec l'apparition du carbure, R et ρ diminuent, puis deviennent constants et ne dépendent ensuite que du carbone lorsque la teneur en tungstène croît

*État doux* — Recuit vers 900°, suivi d'un refroidissement très lent

*État dur* — Chauffer à une température variant de 900° à 1200°, suivant la teneur en tungstène Trempe à l'air ou à l'huile

Comme résultat, on obtient une martensite très fine mêlée à du

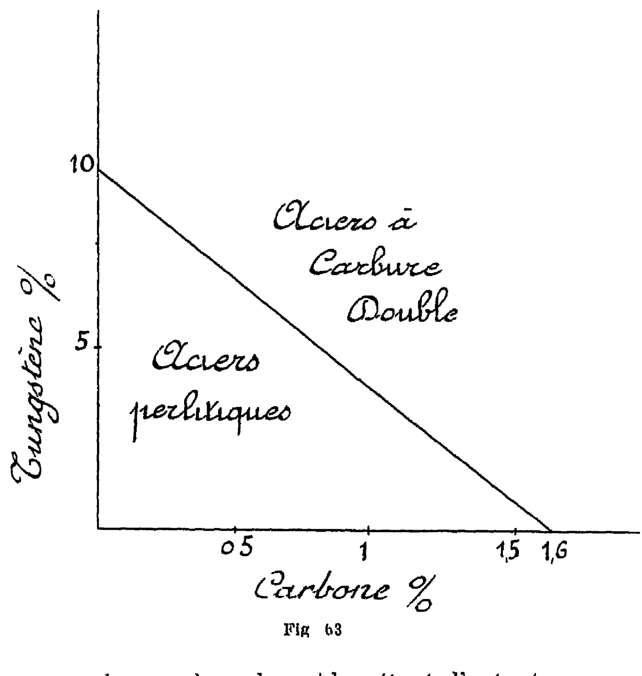



Fig 63

carbure non dissous, le carbure libre étant d'autant moins abondant que la chauffe a duré plus longtemps et a été exécutée à une température plus élevée

*Usage*. — Aciers à aimants

C = 0,4 à 0,7
Tu = 4 à 12%

§ 5 ACIERS AU SILICIUM

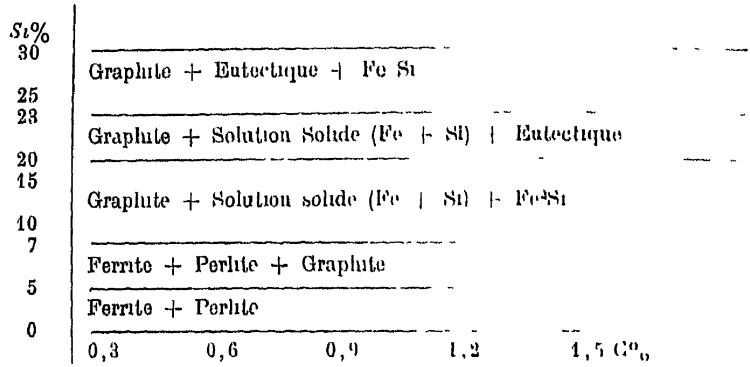



Fig 64
Diagramme des aciers au silicium

L'introduction du silicium dans un acier relève les points $A_1$ et $A_1$, jusqu'à une teneur d'environ 2 %. Une teneur plus élevée n'apporte pas de modification

A l'inverse du manganèse, le silicium diminue la saturation du fer par le carbone Il précipite le carbone quand il atteint une certaine valeur à l'état de graphite

La solution fer-carbone devient solution fer-silicium

*Combinaisons fer-silicium* Le fer et le silicium forment ensemble trois combinaisons

$Fe^2Si$, qui forme avec le fer une solution solide qui ne dissout le carbone qu'en faible quantité

Fe Si, qui ne fait son apparition qu'à partir de 23 % de Si jusqu'à 30 %

Et $Fe\,Si^2$, qui ne fait son apparition que pour des teneurs en silicium supérieures à 50 %.

Il faut noter le fait suivant signalé par Guillet.

La constitution des aciers au silicium est indépendante de la teneur en carbone et dépend uniquement de la teneur en silicium. De sorte que le diagramme établi par Guillet jusqu'à 30 % de silicium (fig 64) se compose d'une série d'horizontales, et peut se résumer comme suit

1° Entre 0 et 5 % de silicium, tout le carbone est dissous à chaud.

Au refroidissement, on a de la ferrite et de la perlite, caractéristique des aciers perlitiques,

2° Entre 5 % et 7 % de silicium, il y a une zone de transition dans laquelle le graphite fait son apparition,

3° Entre 7 % et 20 % de silicium, tout le carbone est à l'etat de graphite Le silicium est en solution solide (c'est-à-dire solution de $Fe^2Si$ dans le fer) Un peu de $Fe^2Si$ peut être libre

4° Entre 20 % et 23 % de silicium, on a du graphite de la solution solide (Fe + Si) et de l'eutectique ($Fe^2Si$ + Fe Si)

5° Entre 23 % et 30 %, on a du graphite, l'eutectique ($Fe^2Si$ + Fe Si) et enfin du Fe Si libre

Les aciers au silicium ne sont intéressants que lorsqu'ils ne contiennent pas de graphite Cela exige donc une basse teneur en silicium

Ce sont ces derniers aciers que nous envisagerons, les aciers graphitiques ayant des allongements et des résiliences excessivement faibles

Dans les aciers non graphitiques, le silicium augmente un peu R et E Il augmente très légèrement la résilience dans le sens du laminage, mais l'annule, pour ainsi dire, dans le sens du travers·

*État doux État dur* Mêmes conditions que pour les aciers ordinaires au carbone

*Usage* *Aciers à ressorts*

C = 0,5 Si = 1,5

donnant environ avant trempe

R = 80 E = 50 A = 15

et après trempe à 900° et revenu à 425°

R = 130 E = 120 A = 8 en long = 5, en travers = 1

2° *Acier à tôle de dynamos* — Choisi pour cet emploi à cause de sa très faible hystérésis et sa grande perméabilité

C = 0,100
Si = 3 à 4

*Remarque* — L'acier à formule moyenne

C = 0,4 Mn = 0,7 Si = 1,6

constitue l'acier mangano-siliceux (à l'état recuit, il donne environ R = 80, A % = 16, Δ = 200).

Cet acier est trempé à 850° et revenu à 500° (à l'état trempé, il donne environ R = 110, A % = 9, Δ = 350).

*Usage* — Utilisé pour fabriquer des organes d'automobile remarquables par leur dureté et des ressorts. Pour ces derniers, la teneur en carbone doit être comprise entre 0,4 et 0,6. Au dessous de 0,4, trempe insuffisante, au-dessus de 0,6, résilience presque nulle.

§ 6. Aciers au molybdène. — Comme le tungstène et le silicium, le molybdène élève les points de transformation, en augmentant l'hystérésis, ainsi que le tungstène, ce qui rend la trempe particulièrement délicate.

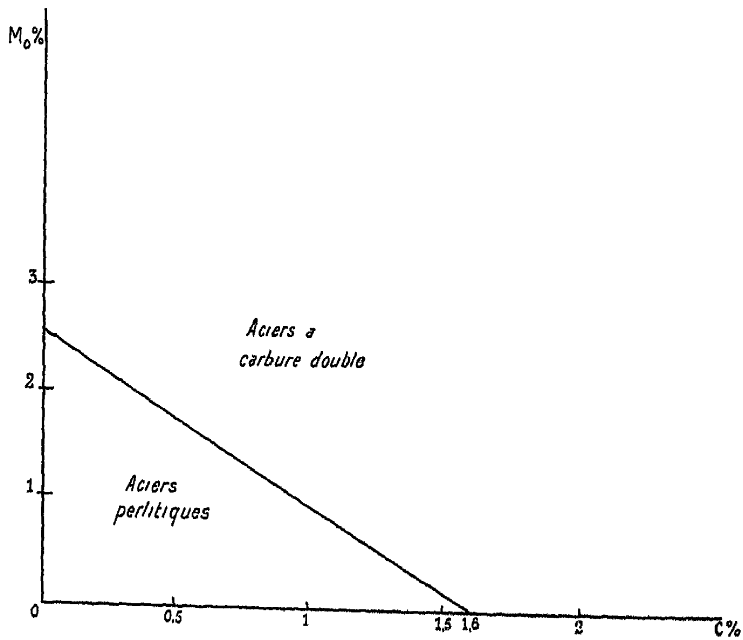



Fig. 65

Le diagramme des aciers au molybdène est analogue à celui des aciers au tungstène (fig 65).

Il comprend deux régions la région des aciers perlitiques et celle des aciers à carbure double

Pour les aciers au tungstène, comme pour les aciers au molybdene, la ligne frontiere part de 1,6 de carbone, mais alors qu'elle aboutit à 10 % de tungstène, elle aboutit ici à 2,5 de molybdene, c'est-à-dire a une teneur quatre fois moindre du constituant special Le molybdène modifie donc beaucoup plus rapidement que le tungstène la structure de l'acier Les aciers perlitiques sont de beaucoup les plus intéressants Ils augmentent d'une façon considérable les charges de rupture en laissant coexister de beaux allongements Le molybdene est souvent ajouté comme deuxième ou troisieme constituant d'addition pour conférer un supplément de caractéristiques a des aciers complexes

§ 7 ACIERS AU VANADIUM – Le vanadium a peu d'influence sur la position des points critiques et sur l'hysterésis

Le diagramme (fig 66) montre l'influence du vanadium sur la texture des aciers

Il comprend trois regions

1° celle des aciers perlitiques,
2° celle des aciers à carbure double
3° celle des aciers à perlite et à carbure

*Aciers perlitiques* Le vanadium augmente la limite elastique et la charge de rupture En revanche, la résilience et l'allongement diminuent Mais ces diminutions sont très largement compensées par les augmentations de E et de R

*Aciers à carbure double* — Les aciers au vanadium à carbure double ont une faible resistance, une très faible résilience avec un allongement moyen. Ils ne prennent pas la trempe, le carbure de vanadium n'étant pas miscible dans l'acier.

*Aciers à perlite et à carbure* — Les aciers de la zone perlite et carbure ont des propriétés intermédiaires entre les aciers perlitiques et les aciers à carbures

Ils prennent la trempe La perlite donne naissance à la marten-

site, le carbure restant intact Il faut noter que les aciers à haute teneur en vanadium sont peu homogènes

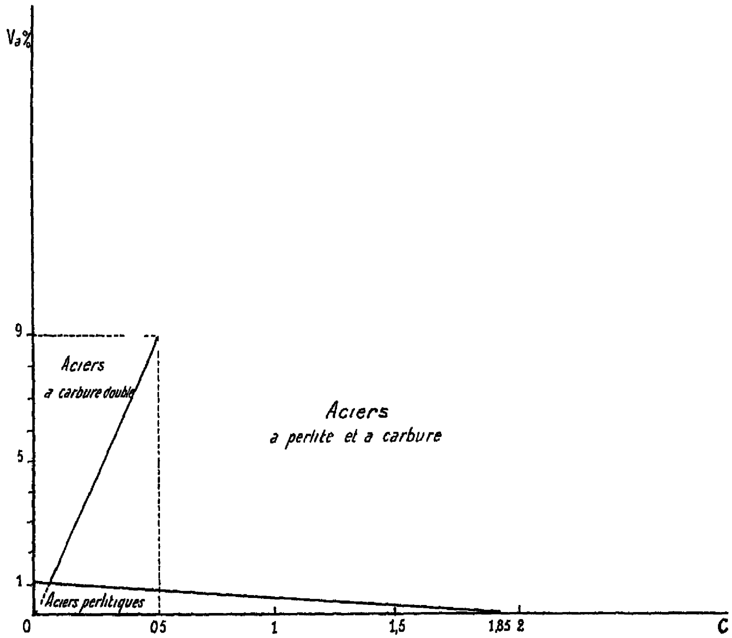



Fig 66

Comme le molybdène, le vanadium est surtout utilise à faible teneur comme deuxième ou troisième constituant d'addition dans les aciers complexes

## B. — ACIERS TERNAIRES

§ 1 Aciers nickel-chrome — On entre dans la série des *aciers ternaires*, c'est-à-dire ayant deux constituants étrangers en plus des éléments fer-carbone

Dans cette catégorie, les constituants sont le fer, le carbone, le nickel, le chrome

Comme nous l'avons vu, le nickel augmente l'allongement et la résilience

Le chrome fournit la dureté, mais diminue la résilience

En faisant appel aux aciers nickel-chrome, on a voulu faire coexister des valeurs intéressantes de A, Δ et ρ

On conçoit donc que cette catégorie d'aciers ait, au point de vue industriel, une importance primordiale

*Classement* — Il y a cinq groupes d'*aciers nickel-chrome*, à savoir

1° Les aciers perlitiques,
2° Les aciers martensitiques,
3° Les aciers a martensite et à carbure,
4° Les aciers a fer γ,
5° Les aciers à fer γ et à carbure

Disons de suite que les groupes 3 et 5, dans lesquels le carbure fait son apparition, n'ont qu'un interêt spéculatif Étant donné le but poursuivi dans cette exposition, nous ne nous en occuperons pas

Restent les trois groupes perlitiques, martensitiques, acier a fer γ

On aboutit donc pratiquement à la même classification que celle des aciers au nickel

### Considération théorique.

Prenons comme point de départ un acier au nickel perlitique Voir diagramme (fig 58) Ajoutons du chrome

Nous aurons alors

$$\frac{C + Ni}{\text{perlitique}} + Cr$$

La structure de l'acier ternaire ainsi réalisé dependra de la somme C + Ni + Cr (1), et en particulier, au point de vue de l'addition de chrome de la somme C + Ni de départ que dans le cas present nous avons suppose caractériser un acier perlitique

Les faibles adjonctions de chrome laissent subsister un acier perlitique trempant à l'eau ou trempant à l'air, c'est-à-dire autotrempant

(1) On a donné comme coefficients d'equivalence les valeurs suivantes 1,65 de carbone = 29 % de nickel = 18 % de chrome, c'est-à-dire que 0,1 % de carbone peut être remplace par 1,75 % de nickel ou par 1,1 % de chrome

La composition des aciers industriels nickel-chrome, non autotrempants est approximativement la suivante .

C = 0,20 a 0,30
Ni = 2 a 3
Cr = compris entre 0,5 et 1

Celle des aciers auto-trempants

C = 0,20 à 0 30
Ni = 4 à 5
Cr = compris entre 1 et 2

*Avec les teneurs en chrome, ci-dessus indiquees*, on constate que pour les premiers la somme

C + Ni + Cr est inférieure à 5
et supérieure à 5 pour les auto-trempants, somme limitee à 7 ou à 8

Remarque commode au point de vue pratique et qui ne pretend à aucune précision scientifique

Si la variable Cr prend une valeur un peu plus grande, on passe au groupe supérieur, c'est-à-dire au groupe martensitique, et la formation de la martensite dépend de la somme

C + Ni + Cr

Si l'on ajoute du Cr à un acier au nickel martensitique, l acier reste martensitique si Cr additionné est assez faible Cr augmentant, il se forme du carbure. On obtient ensuite un mélange

martensite — carbure — fer $\gamma$

L'addition de Cr dans un acier au nickel à fer $\gamma$ finit par donner le mélange

carbure fer $\gamma$

Pratiquement, nous allons étudier sur des exemples

1° les aciers perlitiques non auto-trempants;
2° les aciers perlitiques auto-trempants,
3° les aciers austénitiques ou à fer $\gamma$

## Caractère commun.

Abaissement des points de transformation

### a) *Aciers perlitiques non auto-trempants.*

*État doux* — Recuit (méthode generale, chapitre XI

*État dur* — Trempe (méthode générale, chapitre XII), suivie d'un revenu permettant d'obtenir les caracteristiques desirées

Nous avons étudié deux types d'aciers au nickel perlitiques

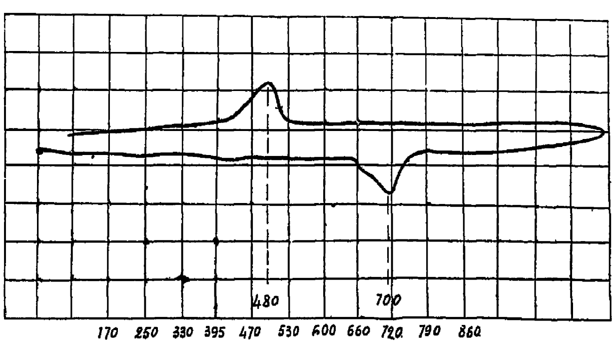
**1° Étude d'un acier nickel-chrome perlitique** (*Type n° 1*) (1)

(N° 22 du tableau standard)

Analyse chimique { C = 0,17 ; Ni = 6,02 ; Cr = 0,33 ; Mn = 0,65

**Courbe des points critiques de l'acier au nickel-chrome perlitique**

*(Type n° 1)*



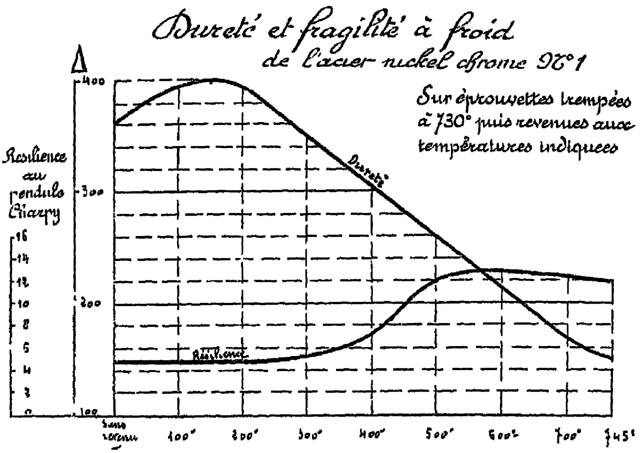

| | |
|---|---|
| Point critique à l'échauffement | 700° |
| Point critique au refroidissement | 480 |
| Température de trempe | 730 |

Fig 67

---

(1) Cet acier est, à vrai dire, à peine un acier *ternaire*, la quantite de chrome qu'il renferme étant très faible et inférieure à celle qui a été donnee précédemment, ce qui permet une teneur plus élevee en nickel, sans auto-trempe Il se rapproche davantage des aciers *binaires* au nickel Sa seule teneur C + Ni est d'ailleurs supérieure à 5 Neanmoins cette formule ayant des applications importantes pour l'aéronautique (fabrication des tubes, bielles, essieux), il a paru intéressant de fournir une documentation à son sujet Il est indiqué au tableau Standard sous le n° 22, et est classé comme acier au nickel.

**Caractéristiques mécaniques**




*Températures de revenu*

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Recuit à 750° | R = 70 | E = [illegible]0 | A % = 18 | [illegible] = 12 |
| Trempé à l'eau à 720° sans revenu | R = 120 | E = 110 | A % = 8 | [illegible] = [illegible] |

Fig 68

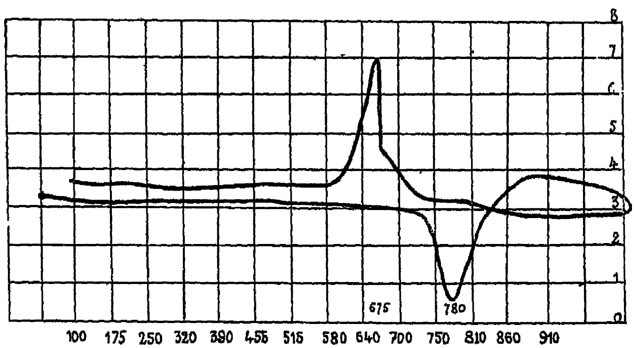
## 2° Étude d'un acier au nickel-chrome perlitique (*Type n° 2*)

(N° 32 du tableau Standard)

Analyse chimique:
- C = 0,3
- Ni = 2,55
- Cr = 0,77
- Mn = 0,34
- Si = 0,31

Analyse micrographique (Voir photogrammes 1, 2, 3 et 4, planche XVII)

**Courbe des points critiques de l'acier au nickel-chrome perlitique**
***(Type n° 2)***

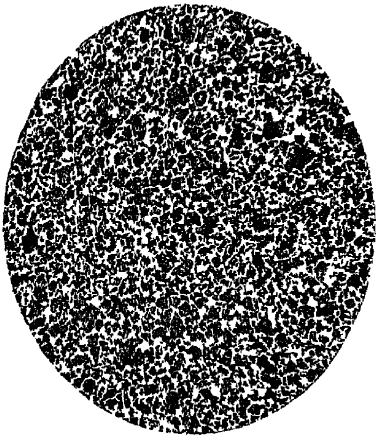



| | |
|---|---|
| Point critique à l'échauffement | 780° |
| Point critique au refroidissement | 675 |
| Température de trempe | 810 |

Fig 69

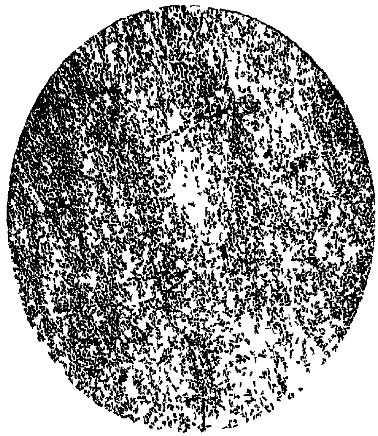
# ACIER NICKEL-CHROME PERLITIQUE

## TYPE N° 2



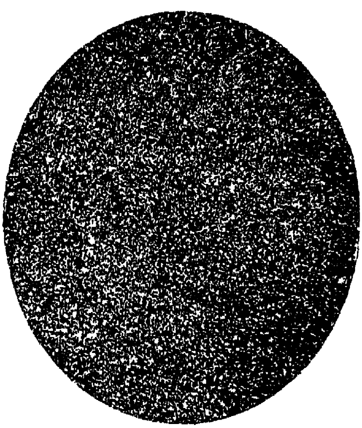
1

Naturel



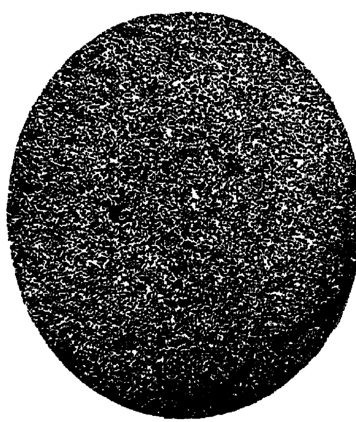
2

Trempé à l'eau à 800° Sans revenu



3

Trempé à l'eau à 800° Revenu à 600°

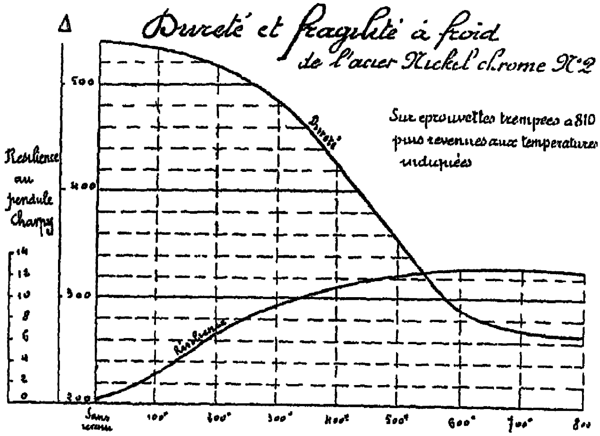


4

Trempé à l'eau à 800° Revenu à 800°

PLANCHE XIV

**Caractéristiques mécaniques**




*Températures de revenu*

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Recuit à 830° | R = 80 | E = 68 | A % = 18 | ρ = 12 |
| Trempé à l'eau à 810° et revenu à 250 | R = 160 | E = 140 | A % = 8 | ρ = 8 |

Fig 70

*Usage des aciers nickel-chrome perlitiques* — Les aciers nickel-chrome perlitiques peu carburés comme l'acier n° 1 sont très propres à la cémentation La présence du chrome permet d'avoir une surface très dure, sans fragilité, comme nous l'avons expérimenté avec l'acier n° 1 qui a été utilisé pour des pièces travaillant à la dureté et au choc et ont donné un excellent rendement Les aciers type n° 2 permettent d'associer à froid à une bonne résilience une dureté supérieure à celle du type n° 1

Les deux types d'acier peuvent être utilises pour des pièces de moteurs ne devant pas être portées à une température très élevée, comme nous le verrons au chapitre XXIII

Les températurs de revenu de ces aciers dépendent des qualités qui doivent prédominer suivant l'emploi Δ ou ρ

Consulter les courbes que nous avons données à cet effet

### *b*) *Aciers auto-trempants*

La teneur minimum de chrome de ces aciers est de 0,8 environ Ces aciers trempent à l'air

*Traitements thermiques* — Forgeage et recuit apres forgeage (méthode génerale, chapitre XI)

*État doux* — (Méthode genérale, chapitre XI Cas particulier des aciers à transformations retardées )

*État dur* — Trempe à l'air

Chauffage à T + 25

dans les conditions réglementaires

Rester à T + 25 pendant cinq a dix minutes suivant les dimensions de la pièce

Laisser refroidir a l'air

Nous avons étudié trois types d'acier nickel-chrome autotrempants, ayant approximativement les compositions suivantes

| | | |
|---|---|---|
| Type 1 | C | = 0,4 |
| | Ni | = 5 |
| | Cr | = 0,9 |
| Type 2 | C | = 0,20 |
| | Ni | = 5 |
| | Cr | = 1,7 |
| Type 3 | C | = 0,4 |
| | Ni | = 4 |
| | Cr | = 2 |

Les types 1 et 2 ont même teneur en Ni

Mais le premier a une teneur maximum carbone et une teneur minimum chrome

Le deuxième a une teneur minimum carbone et une teneur voisine du maximum chrome

Un troisième type a une teneur maximum carbone comme le type 1, mais le chrome est poussé à son maximum, tandis que la teneur en nickel est légèrement diminuée

L'etude des caractéristiques à froid et a chaud de ces aciers est susceptible de conduire à des conclusions intéressantes sur les influences réciproques des constituants et sur le choix à faire, suivant l'emploi du métal Ces conclusions seront données au titre X

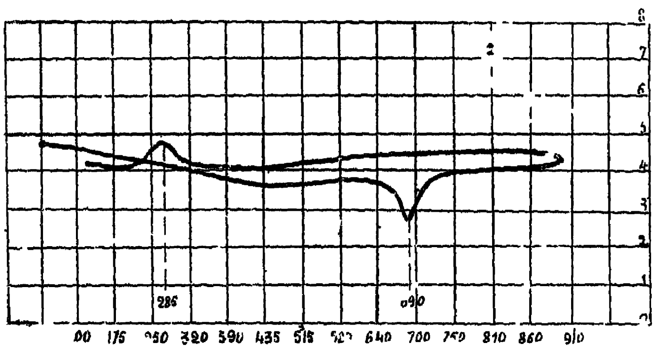
**1° Étude d'un acier au nickel-chrome auto-trempant** (*Type n° 1*).

(N° 34 du tableau Standard)

| | | |
|---|---|---|
| Analyse chimique | C | = 0,39 |
| | Ni | = 4,82 |
| | Cr | = 0,91 |
| | Mn | = 0,42 |
| | Si | = 0,26 |

Analyse micrographique (Voir photogrammes 1 et 2, planche XVIII)

**Courbe des points critiques de l'acier au nickel-chrome auto-trempant**
**(*Type n° 1*)**




| | |
|---|---|
| Point critique à l'échauffement | 690° |
| Point critique au refroidissement | 285 |
| Température de trempe | 715 |

Fig 71

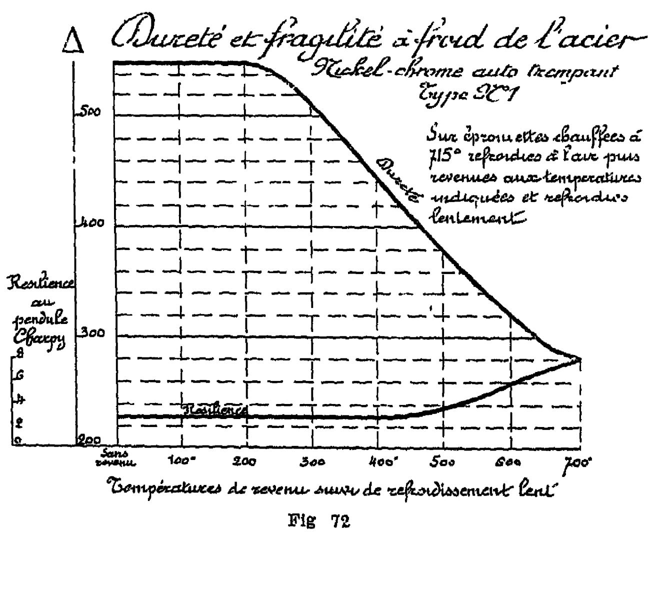
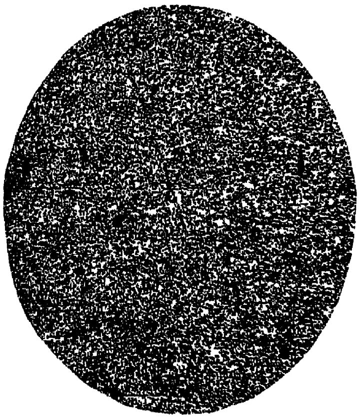



Fig 72

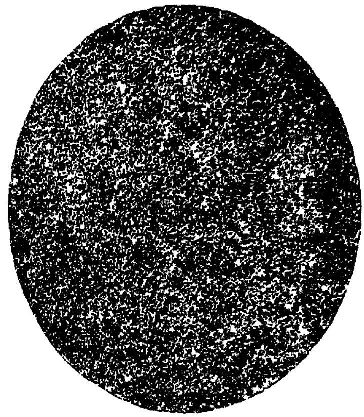
# ACIER NICKEL-CHROME AUTO-TREMPANT

TYPE N° 1



1

Recuit à 690° et refroidi très lentement

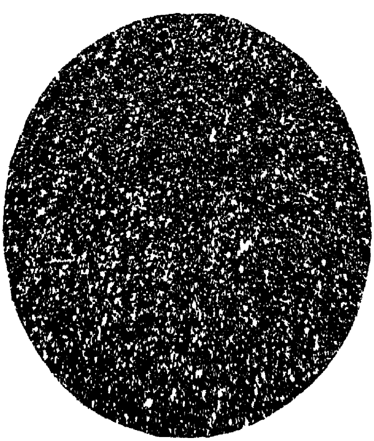


2

Chauffé à 690° et trempé à l'air

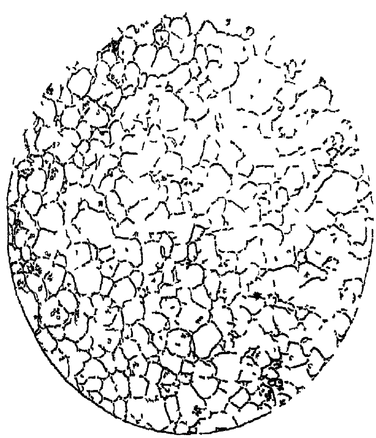
# ACIER CHROME TUNGSTÈNE

TYPE N° 3



3

Recuit à 800° et refroidi très lentement.



4

Trempé à l'air à 1 200° Revenu 700°

PLANCHE XV

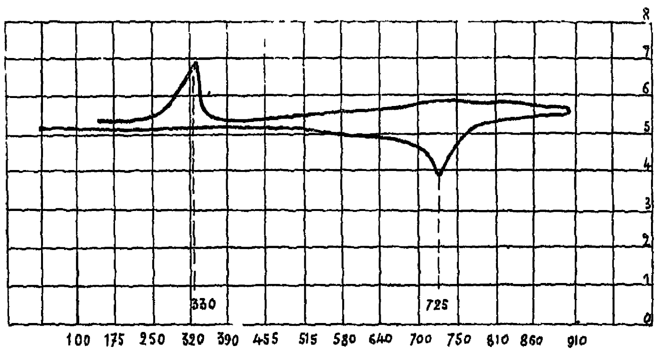
## 2° Étude d'un acier nickel-chrome auto-trempant (*Type n° 2*).

(N° 34 du tableau Standard)

| | | |
|---|---|---|
| Analyse chimique | C | = 0,19 |
| | Ni | = 4,92 |
| | Cr | = 1,71 |
| | Mn | = 0,50 |
| | Si | = 0,23 |

**Courbe des points critiques de l'acier au nickel-chrome auto-trempant**

*(Type n° 2)*




| | |
|---|---|
| Point critique à l'échauffement | 725° |
| Point critique au refroidissement | 330 |
| Température de trempe | 750 |

Fig 73

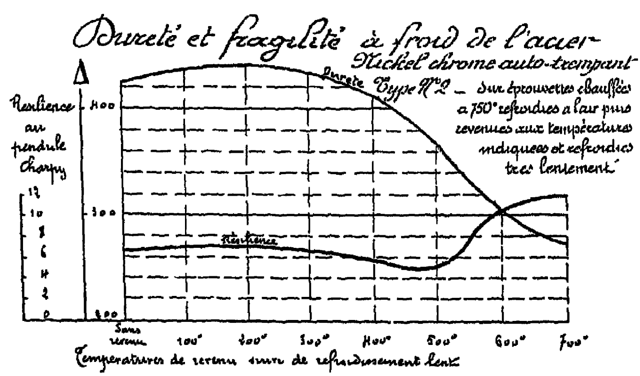



Fig 74

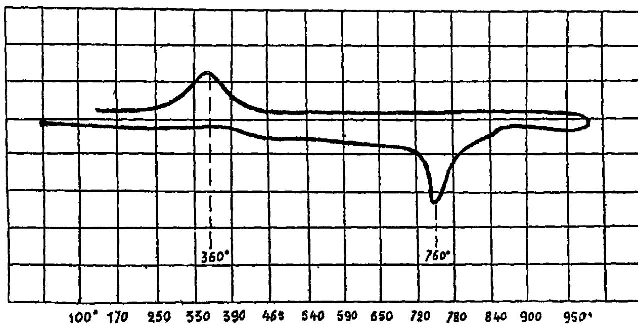
### 3° Étude d'un acier nickel-chrome auto-trempant (*Type n° 3*).

(N° 34 du tableau Standard)

| | | |
|---|---|---|
| Analyse chimique | C | = 0,41 |
| | Ni | = 3,75 |
| | Cr | = 2 |
| | Mn | = 0 40 |
| | Si | = 0 30 |

**Courbe des points critiques de l'acier au nickel-chrome auto-trempant**

*(Type n° 3)*




| | |
|---|---|
| Point critique à l'échauffement | 760° |
| Point critique au refroidissement | 360 |
| Température de trempe . | 775 |

Fig 75

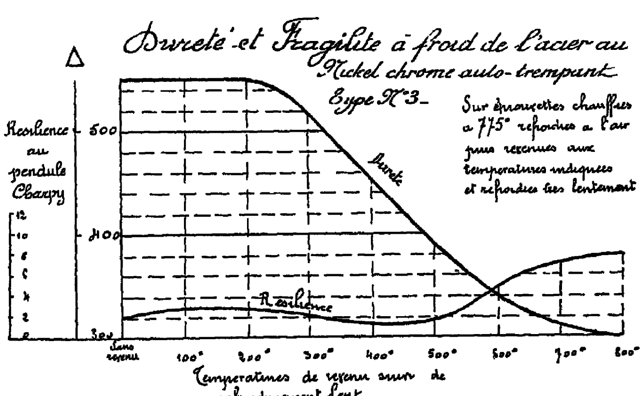



Fig 76

Si nous voulons faire appel à la dureté seulement pour des pièces ne travaillant pas au choc, les aciers 1 et 3 présentent des avantages sur l'acier 2, mais ils ont une faible résilience

L'acier 2, quoique moins dur, présente cependant une dureté qui est intéressante. On peut associer un $\Delta > 400$ avec une résilience $\rho > 6$, ce qui doit faire retenir cet acier pour des pièces demandant la coexistence *dureté-résilience*, dont nous avons signalé l'intérêt

Nous compléterons cette discussion au chapitre XXIII par la considération du *travail à chaud*

Quoi qu'il en soit, les propriétés à froid sont données par les diagrammes que nous avons établis (fig 72, 74, 76), diagrammes qui permettent de déterminer le traitement thermique le plus judicieux pour le but qu'on se propose

*Usages* — *Pièces de moteurs* (Voir chapitre XXIII)

*Blindages* — Pour les blindages, on emploie souvent des aciers de cette catégorie

Ex *Acier Krupp*

C = 0,25 a 0,30 Cr = 1,5 à 2 Ni = 3,5 à 4

*Aciers pour tôles minces*

C = 0,230
Cr = 0,5
Ni = 6
Mn = 2
Si = 0,4

Acier auto-trempant dont le point critique à l'échauffement est 660°-700°

1° *État doux pour usinage* — (Méthode générale) ou effectuer une double trempe à l'eau

1° à 650°
2° à 600°

On obtient ainsi les caractéristiques moyennes suivantes .

R = 105 kg
E = 75
A = 16

NOTA — Les tôles ayant subi la double trempe a l'eau peuvent être usinées, travaillees et pliées

Il est nécessaire de refaire, après les operations de gabariage ou d'emboutissage, la double trempe, pour enlever tout écrouissage

2° *État dur* — (Méthode générale) ou trempe à l'huile à 800° donnant les caractéristiques moyennes

R = 160 E = 130 A = 7

Ne pas oublier qu'apres l'obtention de l'état dur, on ne peut faire que des retouches insignifiantes

Les tôles peuvent être utilisées dans les deux etats precités, etat doux et état dur

Comme état final il y a lieu, surtout pour les plaques minces (3,5 mm et au-dessous), de préférer l'etat doux, *moins dur*, mais aussi *moins fragile*

Le metal peut se souder au chalumeau oxy-acetylenique avec ou sans métal d'apport

Le métal rapporte peut être, soit de l'acier de blindage, soit de l'acier doux ordinaire

3° *Aciers nickel-chrome à fer* $\gamma$ — Ces aciers polyedriques ont une grande résilience, une grande résistance à l'usure, en consequence sont très difficiles à travailler

L'usine d'Imphy fabrique un de ces aciers qui donne a l'analyse

C = 0,6 Cr = 2 Ni = 23

et comme caractéristiques mécaniques

R = 75 E = 45 A = 37

Sert à fabriquer des tôles de blindage de 3 à 4 mm d'épaisseur

*Aciers inoxydables* — Nous verrons au paragraphe 5 de ce chapitre l'utilisation de ces aciers austéniques pour la fabrication des aciers inoxydables

§ 2 Aciers chrome-tungstène — Les groupes dans lesquels on peut diviser ces aciers sont assez vaguement délimites

On a cependant trois classes

1° Les *aciers perlitiques* (renfermant peu de chrome et peu de tungstène),

2° Les *aciers à carbure double* (renfermant peu de chrome et beaucoup de tungstène),

3° Les *aciers à texture martensitique* (renfermant beaucoup de chrome et peu de tungstène)

Nous éliminons de suite la troisieme classe composée d'aciers pour ainsi dire inusinables

Les aciers de la première catégorie sont peu utilisés

Le tungstène doit être en proportion de moins de 2 % pour laisser à ces aciers le caractère perlitique

La classe de beaucoup la plus importante est celle des aciers a carbure double.

La grande caractéristique des aciers chrome-tungstène de cette famille, c'est de posséder, après traitement approprié, une grande dureté, même à une température de travail élevee

Cette dureté est qualifiée de *durete au rouge*

Cette propriéte est utilisée pour les aciers à outils dits *aciers à coupe rapide* (1)

D'après MM Taylor et White, un acier a coupe rapide ayant donné les meilleurs résultats avait la composition suivante

| | |
|---|---|
| Tungstène | 18,91 |
| Cr | 5,47 |
| C | 0,67 |
| Mn | 0,11 |
| Vanadium | 0,29 |
| Si | 0,043 |

Aujourd'hui on a encore augmenté la teneur en tungstène des aciers (20 à 24 %), ajouté parfois du cobalt (5 à 6 % en remplacement d'une quantité égale de tungstène) et augmenté de ce fait le rendement. Ajoutons que les aciers à coupe rapide sont moins durs à froid que les aciers à outils au carbone trempés Mais alors

(1) Voir cap Grard, « Aciers à outils » (*Revue d'Artillerie*).

que ces derniers commencent à perdre leur durete dès qu'on atteint 200°, les autres la conservent jusqu'à 600°

Les aciers à grande teneur en tungstène, qui constituent la catégorie importante des aciers à outils, sont traités comme il suit

*État doux* — Après forgeage, chauffer l'acier a 800° et laisser refroidir dans le four ou dans le sable

*État dur* — 1° Chauffer lentement jusqu'à 800-850°, le maintenir 20 minutes à cette température, puis chauffage rapide jusqu'au-dessous du commencement de fusion;

2° Refroidir rapidement jusqu'à 600° au moins, ensuite lentement ou rapidement,

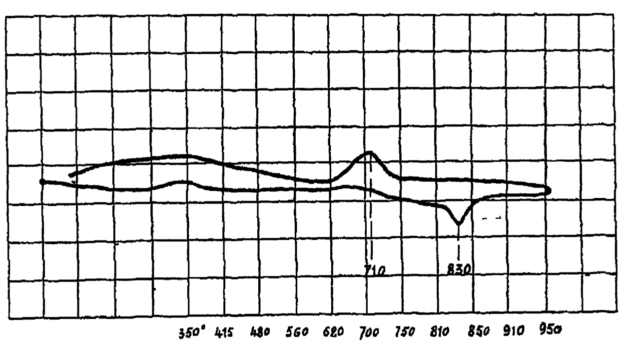
3° Réchauffer à 625° pendant cinq minutes et refroidir a l'air

Nous avons étudié trois aciers chrome-tungstène ayant des compositions différentes, pour mettre en évidence les caractéristiques « à froid » de ces aciers

**1° Étude d'un acier chrome-tungstène** (*Type n° 1*).

Analyse chimique:
- C = 0,59
- Cr = 4,81
- Tu = 7,94
- Mn = 0,34
- Si = 0,29

**Courbe des points critiques de l'acier chrome-tungstène**
(*Type n° 1*),




Point critique à l'échauffement . . . 830°
Point critique au refroidissement . . 710°

Fig 77.

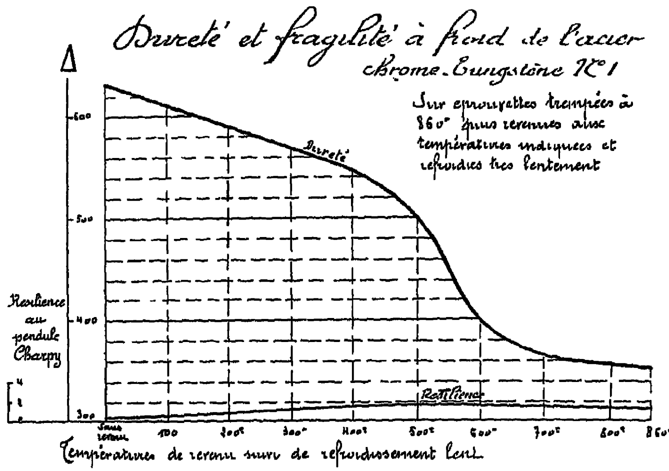
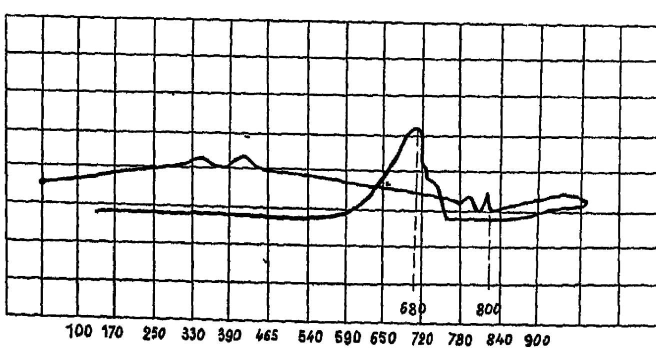



Fig 78

### 2° Étude d'un acier chrome-tungstène (*Type n° 2*).

Analyse chimique { C = 0,4 ; Cr = 1,5 ; Tu = 10,5

**Courbe des points critiques de l'acier chrome-tungstène**
**(*Type n° 2*)**




Point critique à l'échauffement 800°
Point critique au refroidissement . 680°

Fig. 79

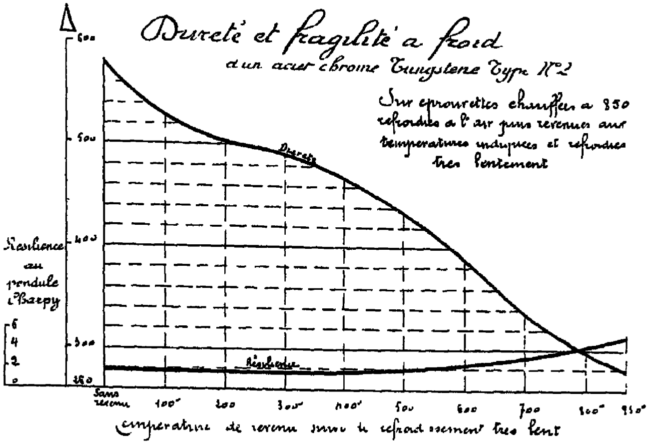



Fig 80

### 3° Étude d'un acier chrome-tungsètne (*Type n° 3*).

(N° 62 du tableau Standard)

| | | | |
|---|---|---|---|
| Analyse chimique | C | = | 0,66 |
| | Cr | = | 2,80 |
| | Tu | = | 18,62 |

Analyse micrographique (Voir photogrammes 3 et 4, planche XIV)

**Courbe des points critiques de l'acier au nickel chrome-tungstene**

***(Type n° 3)***

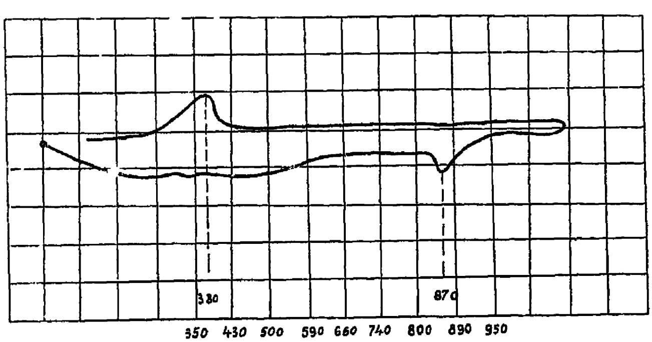



Fig 81

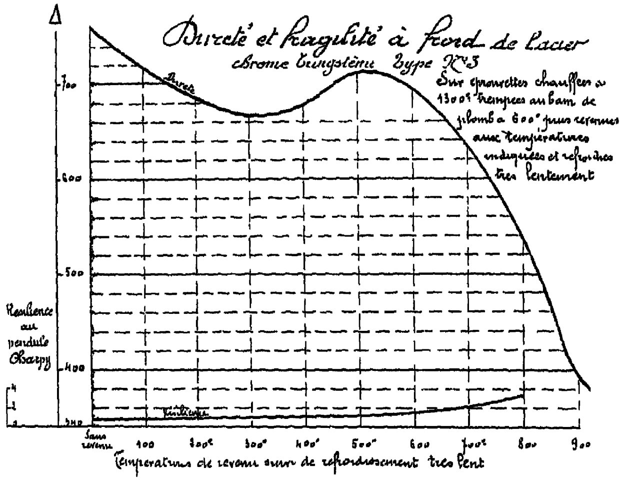


Fig 82

Nous voyons que les résiliences sont très faibles, quel que soit le traitement thermique adopté

Dans ces conditions, au point de vue spécial de l'aviation, les aciers chrome-tungstène, d'ailleurs difficiles à usiner, peuvent être considérés comme dangereux pour les pièces soumises à des chocs (pièces de moteurs).

§ 3. Aciers chrome-silicium. — Certaines pièces de construction mécanique et en particulier les soupapes d'échappement de moteurs d'aviation travaillent à une température très élevée (environ 900°)

Il faut, dans l'étendue de la zone thermique de travail, avoir une résistance au choc, une dureté, une résilience, une inoxydabilité assurées.

De plus pour que ces aciers, appelés à décrire des cycles de travail nombreux dans une zone thermique étendue, puissent résister longtemps aux sollicitations dont ils sont l'objet, il faut que leurs caractéristiques retrouvent après chaque cycle leurs valeurs initiales et que, par conséquent, dans cette zone thermique, il y ait absence de points critiques Dans ces conditions, la réversibilité de l'acier est assurée, c'est-à-dire que l'on retrouve à froid la structure

austénitique ou sorbitique, à l'exclusion de la structure troostitique en coalescence plus ou moins accusée, dont l'hétérogénéite a souvent donné lieu à de graves mécomptes N'étant pas maître de cette zone thermique, on est amené a chercher un acier remplissant les conditions précédemment énumérées et dont les points critiques soient suffisamment relevés pour les rejeter en dehors de la zone thermique de travail

L'association *chrome-silicium* a paru répondre a la question et sous le nom de *Silchromes* des aciers de ce genre ont éte elaborés avec succès en Amérique

Le problème a été étudié en détail par l'un de nous (1) et nous donnons ci-après un résumé de ladite étude

Des aciers ont été élaborés par les usines Holtzer, renfermant des proportions variables de silicium (2, 3 et 4 %), des proportions variables de chrome (12, 13 et 14 %), des proportions variables de carbone (0,3 et 0,4)

Toutes les combinaisons ont ete faites en associant 3 a 3 les diverses teneurs

Le point de transformation Ac passe de 870° (2 % de Si) a 950° (3 % de silicium) et à environ 1100° (4 % de Si)

Il faut noter qu'avec la teneur de 4 % de silicium, il y a depot de graphite, ce qui rend l'acier inutilisable.

Finalement, l'acier chrome silicium de composition suivante

$$C = 0,4 \qquad Si = 2,5 \qquad Cr = 12$$

a été choisi par nous

Ses caractéristiques après trempe a l'air à 1200° et revenu à 900° sont

Point critique à l'échauffement, supérieur à 900°

$$R = 92 \qquad A = 12 \qquad \rho = 4$$

Durete Brinell à froid : 280
Dureté Brinell à 900° environ 40.

---

(1) Note de l'inspecteur general Grard — presentee à l'Academie des Sciences par M Guillet à la séance du 28 décembre 1925 — « Influence de la zone thermique de travail sur la sélection des aciers pour soupapes de moteurs d'aviation » — Cf Inspecteur général GRARD, *Revue de Metallurgie* du 6 juin 1926

La dureté peut être relevee par une légère addition de tungstène ou de molybdène

L'acier ainsi défini est employé comme acier à soupapes pour des moteurs d'aviation et les résultats obtenus sont très satisfaisants, la soupape conservant son poli et le metal sa texture

§ 4 ACIERS CHROME-ALUMINIUM — Ces aciers ont eté mentionnés a l'occasion de la nitruration (Voir chapitre XVII)

§ 5 ACIERS INOXYDABLES — On range sous cette rubrique des aciers peu sensibles à l'oxydation plutôt que des aciers absolument inoxydables

Un facteur important qui doit intéresser est celui de la température Des aciers relativement inoxydables à froid peuvent l'être à température élevée qui peut d'ailleurs être la temperature de travail et d'emploi (moteurs d'aviation, turbines à vapeur)

Les agents d'oxydation peuvent être l'air humide, l'air salin, des vapeurs, des gaz, etc

Les agents de corrosion, comme certains liquides, en particulier l'eau de mer, les acides organiques ou autres, jouent egalement un rôle de désagrégation contre lequel le métal doit être protegé — par sa constitution même — ou par un revêtement approprié si celui-ci est rendu nécessaire

Contre l'oxydation proprement dite, on a cherché à élaborer des aciers spéciaux et les recherches ainsi que les réalisations effectuées a ce sujet peuvent se résumer comme suit

*Aciers binaires* — Les aciers binaires présentant une certaine resistance à l'oxydation sont les *aciers au nickel à fer* $\gamma$ et les *aciers au chrome* martensitiques à carbure de fer et de chrome

Les premiers sont d'une teneur de 35 % à 40 % de nickel Ces aciers, nous l'avons vu, ont des limites élastiques basses (30 à 35 kg) qui s'accommodent souvent mal avec l'emploi qui leur est réservé

Les aciers au chrome (13 à 15 % de chrome) peuvent avoir une faible teneur en carbone

Si l'on augmente la teneur en carbone pour avoir plus de dureté et de résistance (0,3 à 0,5 % de carbone), l'inoxydabilité est accrue si l'on met en dissolution par la trempe la quasi-totalité du carbone.

Il faut noter que la résistance a l'ınoxydabılıté et a la corrosıon est notablement augmentée sı les surfaces sont polıes

Ces dernıers acıers sont partıculıèrement employés pour la coutellerıe

La teneur en chrome a même été poussee jusqu'à 18 % Il semble qu'une teneur moındre est préférable

*Acıers ternaıres* — Maıs aujourd'huı, on faıt surtout appel aux

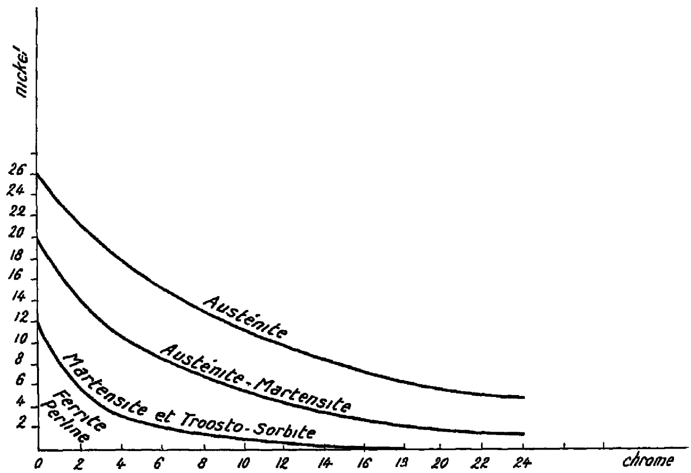



Fıg 83

Diagramme des aciers chrome-nıckel

acıers ternaıres nıckel-chrome dont nous donnons le dıagramme figure 83 établı par Strass et Maurer, des usınes Krupp

On choısıt nettement les acıers purement austénıtıques correspondant à la formule moyenne

Teneur en carbone très faıble, en moyenne 0,1

Chrome 18 a 20 %

Nıckel 6 à 9 %

On a des acıers à solutıon solıde homogène, le carbone étant complètement à l'état de dıssolutıon

Bıen entendu, ces acıers ne prennent pas la trempe Ils ne sont pas magnétıques

Pour évıter la présence de carbone lıbre quı dımınueraıt fatale-

ment la resistance chimique, on chauffe ces aciers à haute température et on les fait refroidir brusquement

Ces aciers ont généralement des limites élastiques assez basses, inférieures à 40 kg, et des résistance inférieures à 80 kg, avec de beaux allongements.

Ces caractéristiques peuvent être modifiées par écrouissage dans le sens de l'augmentation des résistances et de la diminution des allongements Mais on compromet ainsi la résistance à l'inoxydabilité et à la corrosion

De tels aciers ont été fabriques dès 1920 aux usines Krupp, en Allemagne

Les aciers genre Stainless P sont d'une formule analogue

Les aciéries françaises ont, en général, adopté cette formule austénitique qui, à l'expérience, a donné les meilleurs résultats.

On peut lui objecter la faiblesse relative des caracteristiques R et E qui, dans certains cas, peuvent être insuffisantes pour l'emploi

Il semble que ces résistances peuvent être augmentées par quelques modifications dans les teneurs, particulièrement la teneur en carbone

A noter que d'autres formules austénitiques sont employees, comme la suivante

C = 0,2
Cr = 12
Ni = 37 à 38

genre ni-chrome, demandant à la haute teneur en nickel une resistance à l'oxydation aux températures élevées

D'autres formules plus compliquées sont pratiquées, à savoir :

C = 0,35
Cr = 9 à 10
Ni = 28
W = 12

demandant au tungstène une résistance supplémentaire sous l'action de l'air atmosphérique, des gaz chauds, des gaz sulfureux ou acides faibles

*Aciers au cuivre* — Une diminution d'oxydabilite (environ 50 %) a ete obtenue en Allemagne, par l'addition de 0,2 à 0,3 % de cuivre aux aciers, sans nuire aux caractéristiques mécaniques

Des expériences à ce sujet ont été faites en Amérique et concluent à une augmentation de résistance a la corrosion

---

## CHAPITRE XXIII

# ÉTUDE DES CARACTÉRISTIQUES « A CHAUD DES ACIERS

---

### A — DÉTERMINATION DES CARACTÉRISTIQUES « A CHAUD »

Dans les chapitres XXI et XXII, nous avons etudie, pour les aciers ordinaires et les aciers spéciaux, les variations des caractéristiques *à froid*, avec les traitements thermiques donnes

Les indications ainsi obtenues ne nous ont pas paru suffisantes

En effet, les pièces d'acier travaillent quelquefois à des températures très élevées

Les moteurs d'aviation, par exemple, ont certains organes qui sont portés à des températures variant depuis la température ordinaire jusqu'à 400°, 600° et même 800° (soupapes d'échappement de moteurs « fixes »)

Dans ces intervalles de températures, les caractéristiques du metal varient d'une façon très sensible

Les propriétés que ce métal possédait a froid se trouvent considérablement modifiées pour certaines températures

Ces propriétés peuvent même passer par une phase critique, dans une zone de températures qu'on a le plus grand intérêt à connaître.

Les résiliences passent par des minima pour certaines températures dites *temperatures de fragilité*

On ne choisira le métal que s'il n'a pas à travailler dans une zone de température dangereuse, autrement on en proscrira l'emploi

*Mode opératoire* — Nous avons adopté, pour mesurer les caractéristiques à chaud, le mode opératoire suivant

*Dureté* — Des cylindres confectionnés avec l'acier à étudier ont été placés successivement dans un bain liquide (eau, azotate

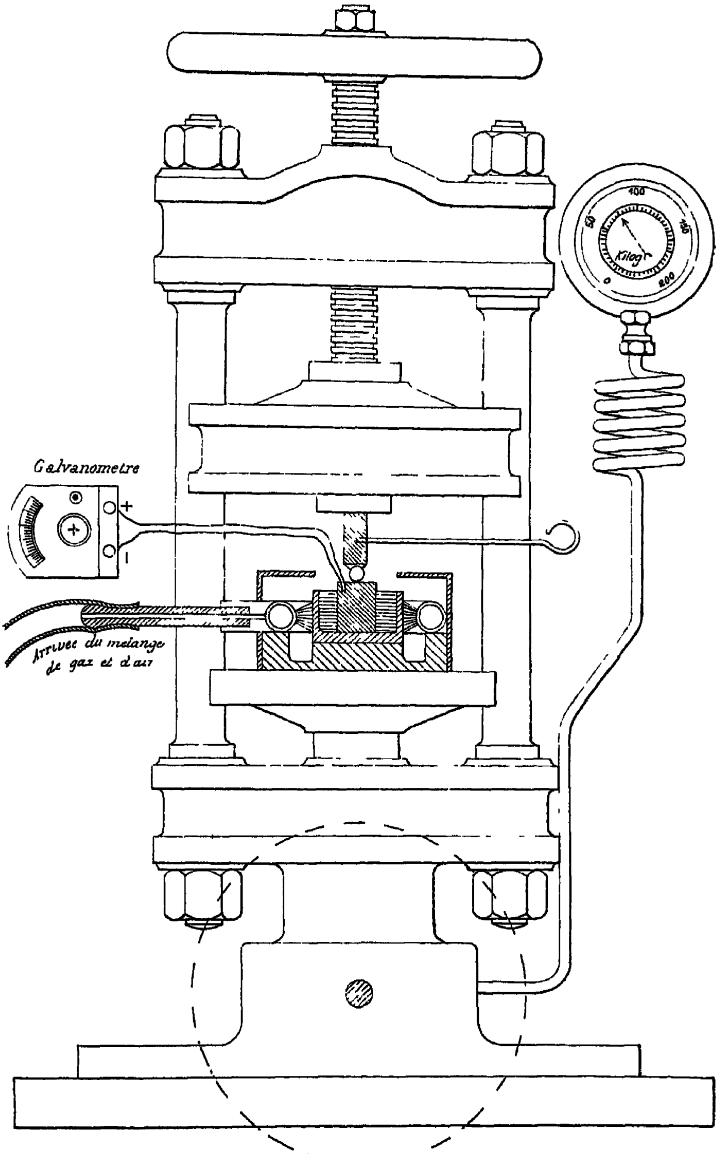

Galvanometre
+
−
100
50
150
0
200
Kilogr
Arrivee du melange de gaz et d'air

Fig 84

de potasse, azotite de soude) renfermé dans un petit récipient en fer placé sur le plateau d'une presse.

Le bain était chauffé à l'aide d'un mélange de gaz et d'air enflammé sortant d'une couronne entourant le récipient (fig. 84).

La température du bain liquide était mesurée au moyen d'un galvanomètre Siemens et Halske dont la soudure se logeait dans une cavité pratiquée dans l'échantillon à étudier.

Lorsque la température était obtenue, on exerçait une pression de 3.000 kg transmise à l'acier à étudier par l'intermédiaire de la bille de Brinell.

Les températures d'expérience ont varié de 25° en 25° depuis 100° jusque vers 650°.

*Fragilité*. — Des éprouvettes Mesnager portées à la température voulue dans un bain liquide étaient cassées sur un mouton-pendule Charpy.

*Réversibilité*. — Enfin nous avons construit trois courbes successives pour un même acier, l'une à l'échauffement, une deuxième au refroidissement et une troisième à un nouvel échauffement pour s'assurer que le phénomène conservait la même allure.

*Métaux étudiés à chaud*. — Nous avons étudié à chaud les métaux présentant de l'intérêt pour un travail à température élevée, à savoir :

1° Aciers au carbone.

a) Acier demi-dur,
b) Acier dur;
c) Acier au creuset (genre acier à outils).

*Aciers exclus*. — Aciers extra-doux et doux, manifestement trop tendres.

Acier extra-dur ordinaire dont le point de transformation est bas, l'usinage pénible, le traitement thermique délicat et la résilience nulle.

2° Aciers au manganèse — 1 % de Mn ;
3° Aciers au nickel perlitiques ;

4° Aciers au nickel-chrome perlitiques non auto-trempants ,

— — — auto-trempants ;

5° Aciers chrome-tungstène à carbure double (quoique ces aciers manifestent à froid une fragilité excessive) chapitre XXII

*Traitement des aciers* — Nous avons pris comme point de départ le traitement thermique suivant des métaux

1° Trempe rationnelle imposee par leurs constituants et precedemment indiquée,

2° Revenu de 600° environ, après trempe, étant donné que c'est la température à laquelle les aciers seront portés dans les experiences en cours Elle donne d'ailleurs, dès le point de départ, une résilience intéressante aux aciers spéciaux

Mais, pour les aciers ne devant pas subir un échauffement de 600°, nous déterminerons au cours de cette étude les revenus inférieurs à leur donner et les caractéristiques en résultant

Nous allons donner successivement toutes les courbes des aciers en question et discuterons les résultats a la fin de ce chapitre

### 1° Aciers au carbone.

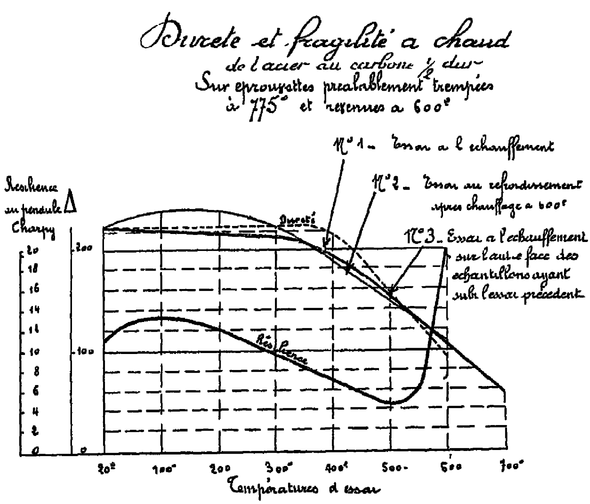



Fig 85

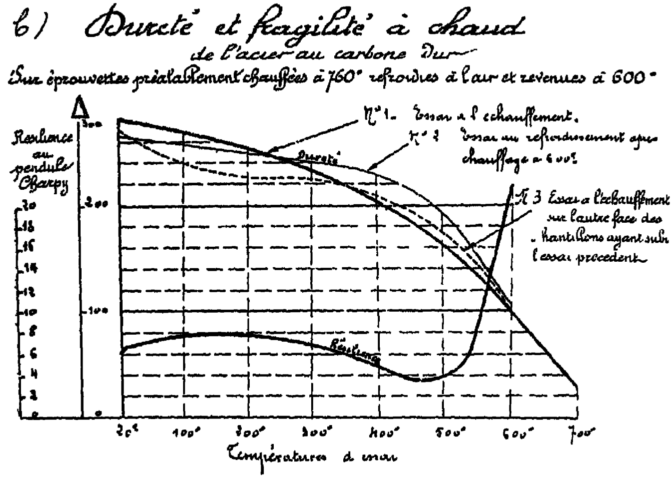

b) Dureté et fragilité à chaud
de l'acier au carbone Dur
Sur éprouvettes préalablement chauffées à 760° refroidies à l'air et revenues à 600°
N° 1. Essai à l'échauffement.
N° 2 Essai au refroidissement après chauffage à 600°
N° 3 Essai à l'échauffement sur l'autre face des échantillons ayant subi l'essai précédent
Résilience au pendule Charpy
Dureté
Résilience
Δ
300
200
100
0
20
18
16
14
12
10
8
6
4
2
0
20°
100°
200°
300°
400°
500°
600°
700°
Températures d'essai

Fig 86

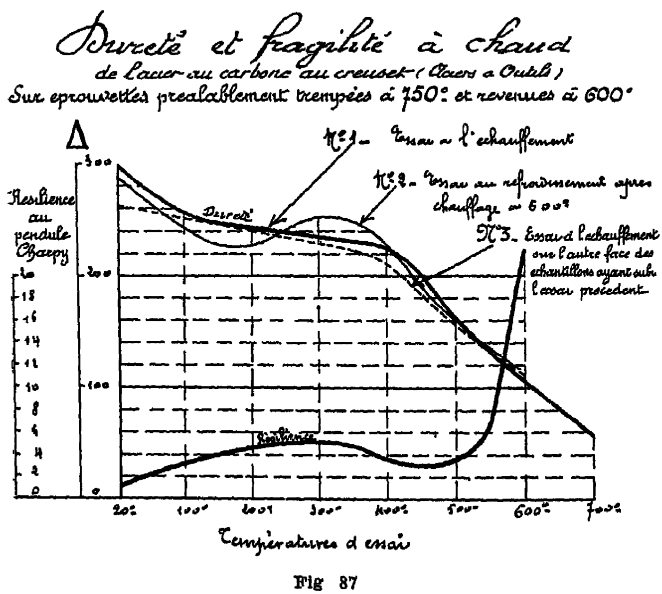

Dureté et fragilité à chaud
de l'acier au carbone au creuset (Aciers à Outils)
Sur éprouvettes préalablement trempées à 750° et revenues à 600°
N° 1 Essai à l'échauffement
N° 2 Essai au refroidissement après chauffage à 600°
N° 3 Essai à l'échauffement sur l'autre face des échantillons ayant subi l'essai précédent
Résilience au pendule Charpy
Dureté
Résilience
Δ
300
200
100
0
20
18
16
14
12
10
8
6
4
2
0
20°
100°
200°
300°
400°
500°
600°
700°
Températures d'essai

Fig 87

## 2° Acier au manganèse perlitique.

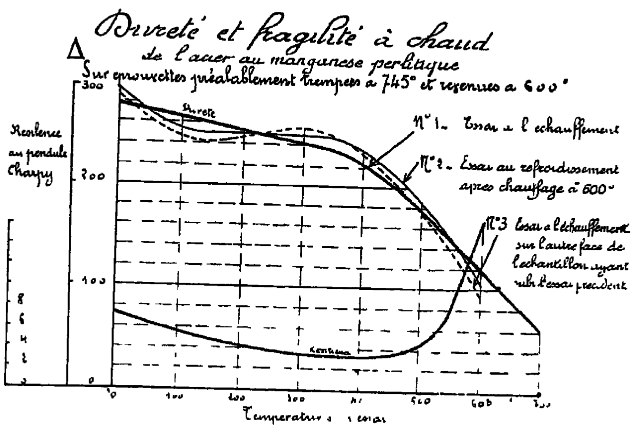



Fig 88

## 3° Acier au nickel perlitique.

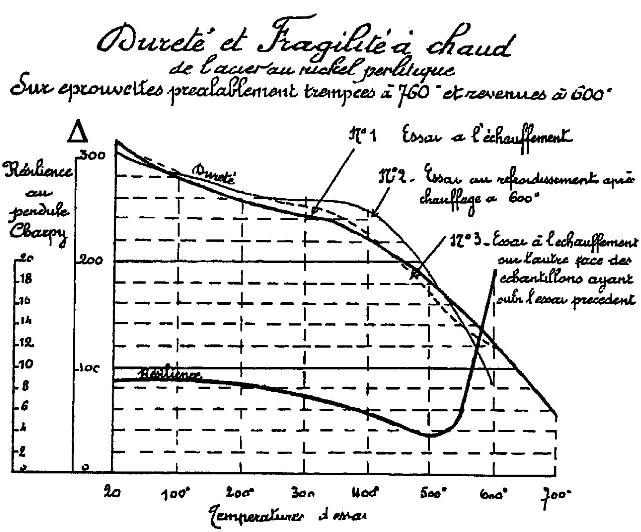



Fig 89

### 4° Aciers au nickel-chrome perlitiques.

Nous avons étudié *à chaud* les deux types dont nous avons déterminé les caractéristiques « à froid »

*a*) Type n° 1. $\left\{\begin{array}{l} C = 0,17 \\ Ni = 6,02 \\ Cr = 0,33 \\ Mn = 0,65 \end{array}\right.$

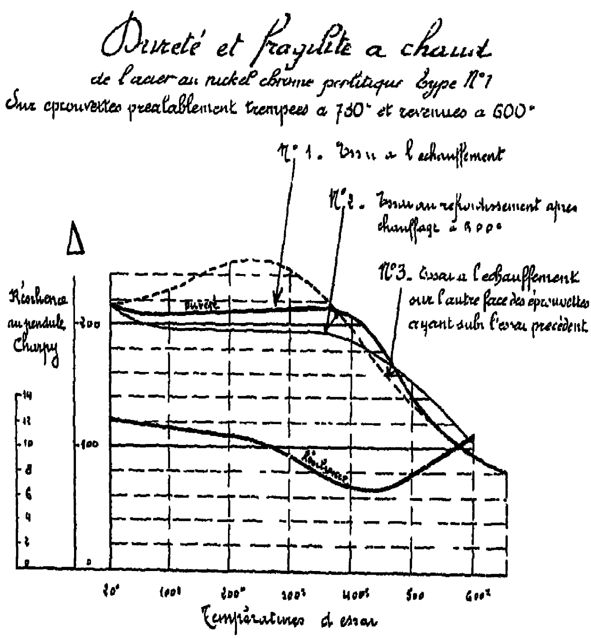



Fig 90

b) Type n° 2 { C = 0,3 ; Ni = 2,55 ; Cr = 0,3 ; Mn = 0,34

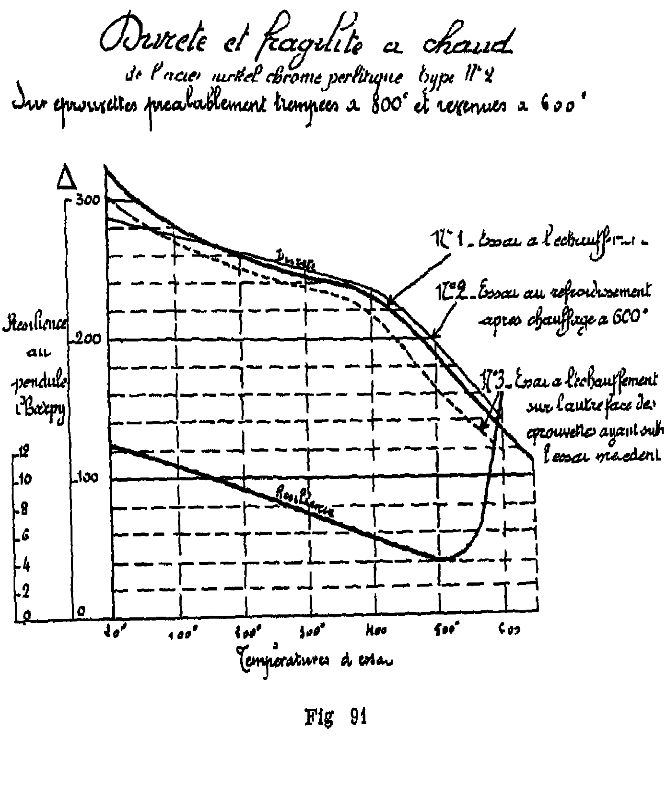



Fig 91

### 5° Aciers nickel-chrome auto-trempants.

Nous avons choisi les trois types dont nous avons déterminé les caractéristiques à froid

a) Type n° 1. $\begin{cases} C = 0,39 \\ Ni = 4,82 \\ Cr = 0,91 \end{cases}$

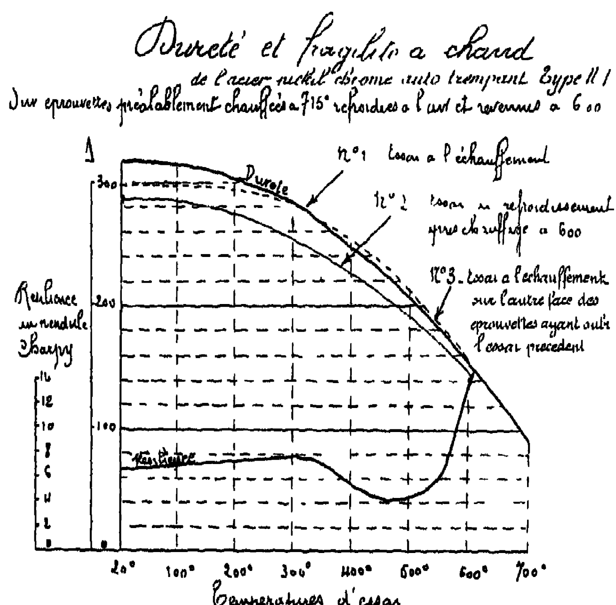



Fig 92.

$b)$ Type n° 2 $\left\{ \begin{array}{l} C = 0,19 \\ Ni = 4,92 \\ Cr = 1,71 \end{array} \right.$

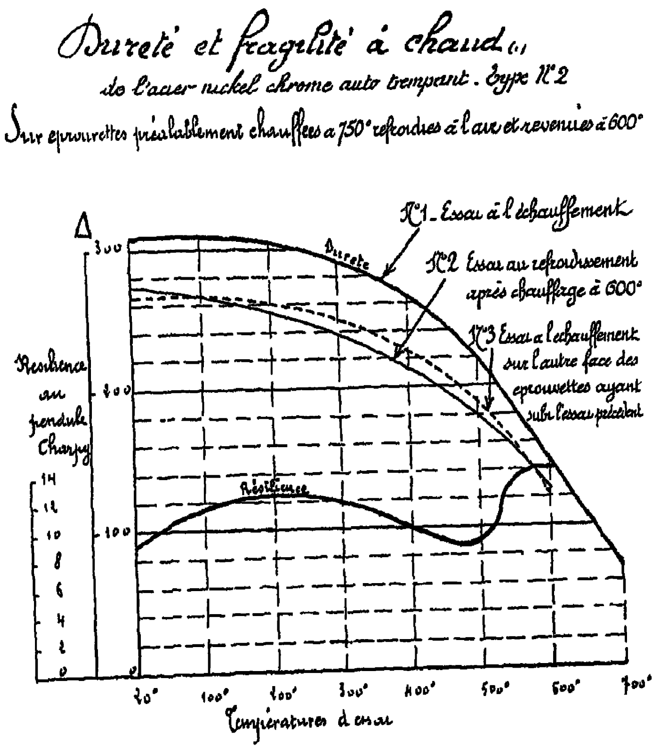



Fig 93

c) Type n° 3. $\begin{cases} C = 0{,}41 \\ Ni = 3{,}75 \\ Cr = 2 \end{cases}$

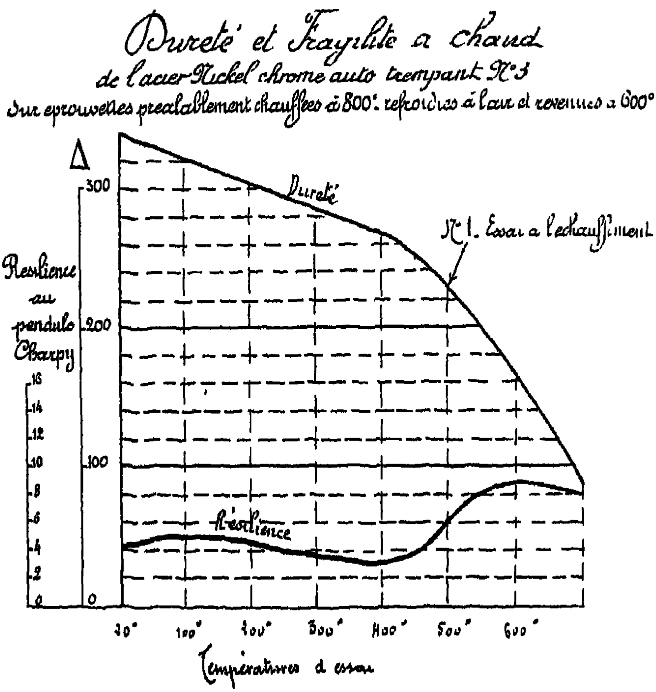



Fig 94

### 6° Acier chrome-tungstène.

Nous avons étudié les trois types mentionnés précédemment a froid

$$a)\ \text{Type n° 1} \begin{cases} C = 0,59 \\ Cr = 4,81 \\ Tu = 7,94 \end{cases}$$

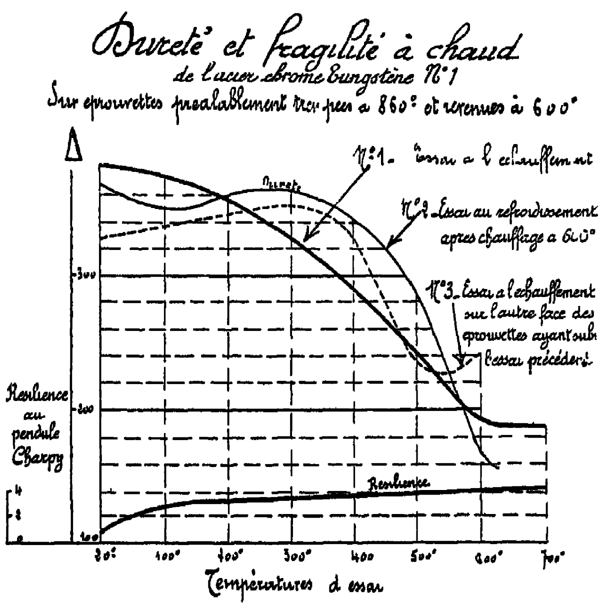



Fig 95

*b*) Type n° 2 { C = 0,4 ; Cr = 1,5 ; Tu = 10,5

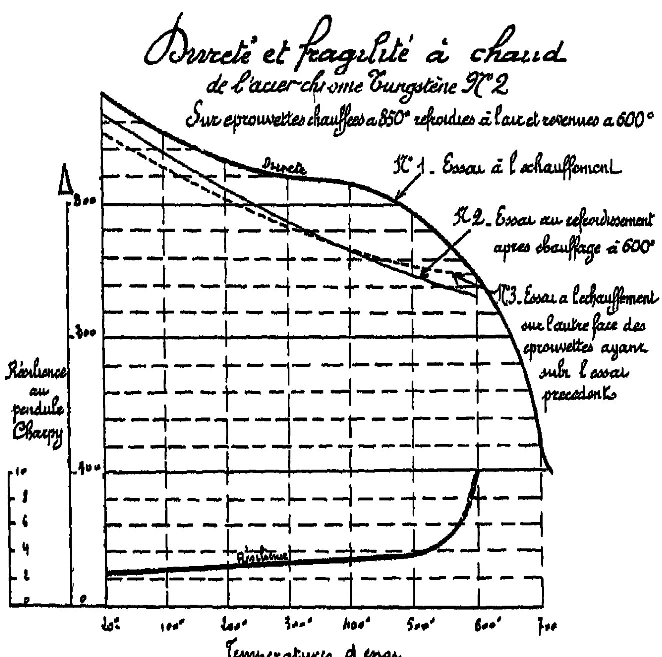



Fig 96.

c) Type n° 3. { C = 0,66
Cr = 2,80
Tu = 18,62

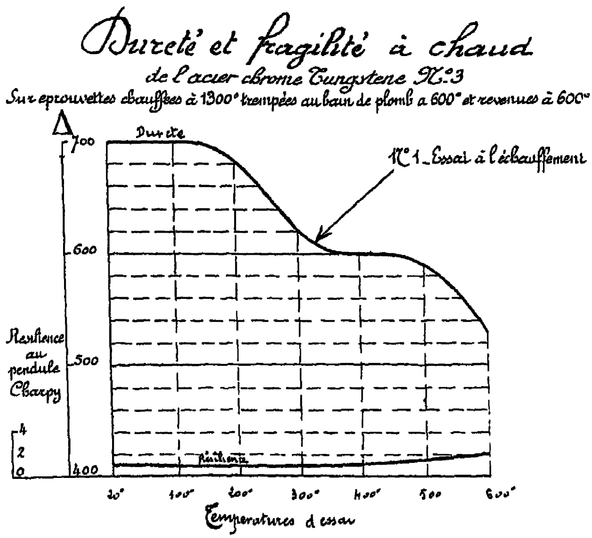



Fig 97

## B. — CONCLUSIONS PRATIQUES POUR LES MOTEURS D'AVIATION

La comparaison des résultats obtenus avec plusieurs aciers différant entre eux par la proportion relative de leurs constituants, a mis en évidence l'influence de ces constituants et donné des indications sur leur dosage

Les résultats obtenus peuvent être résumés ainsi qu'il suit

1° *Aciers au carbone* — *Aciers demi-durs* — Les aciers demi-durs, trempes et *revenus a 600°*, utilisés pour les pièces de moteurs dont l'échauffement ne dépasse pas 400°, donnent

| | |
|---|---|
| A la température ordinaire. | $\Delta = 220$<br>$\rho = 13$ |
| A 400° . . . . . . . . . . | $\Delta = 180$<br>$\rho = 7$ |

Si, dans la zone 0-400°, on peut faire une concession à la dureté aux dépens de la résilience, on adoptera le *revenu à 500°*, au lieu de 600°, et l'on aura

| | |
|---|---|
| A la température ordinaire . | $\Delta = 300$, $\rho = 10$ |
| A 400° . . . . . | $\Delta = 240$, $\rho = 6$ |

*Aciers durs* — Les aciers durs trempés et revenus à 600° utilisés dans la zone 0-300° donnent

| | |
|---|---|
| A la température ordinaire | $\Delta = 300$, $\rho = 7$ |
| A 300° . | $\Delta = 250$, $\rho = 7$ |

ce qui ne procure pas un benéfice sur l'acier demi-dur trempé et revenu à 500°

Pour augmenter la dureté, il faudrait diminuer le revenu, et alors l'acier dur devient fragile et dangereux pour des pièces soumises à des vibrations ou des chocs

2° *Aciers au manganèse* — Le manganèse abaissant d'une façon significative les points critiques, nous n'avons eu à étudier que les aciers au manganèse perlitiques

Ces aciers sont fragiles

L'acier au manganèse doit être *recuit* pour avoir une resilience suffisante, résilience que le moindre échauffement rend trop faible

La dureté « à chaud » diminue assez rapidement

De sorte que nous excluons les aciers qui ne doivent leurs propriétés qu'au manganèse, *quelle que soit la valeur de l'échauffement de la pièce du moteur*

3° *Aciers au nickel perlitiques* — Les aciers au nickel perlitiques

$$Ni = 3 \text{ à } 4\%$$
$$C = 0{,}2 \text{ à } 0{,}3\%$$

trempés et revenus à 600°, utilisés pour les pièces dont l'échauffement ne dépasse pas 400°, donnent

| | |
|---|---|
| A la température ordinaire. | $\Delta = 300$, $\rho = 8$ |
| A 400°. | $\Delta = 220$, $\rho = 6$ |

4° *Aciers au nickel-chrome perlitiques* — Nous avons etudie deux types d'aciers

Type n° 1 (grande teneur en nickel et faible teneur en chrome), 6 % de nickel et 0,20 à 0,40 de chrome,

Type n° 2 (petite teneur en nickel et plus forte teneur en chrome), 2 a 3 % de nickel et 0,60 a 0,80 de chrome

Ils se sont montrés d'une résilience tres faible aux temperatures d'échauffement supérieures à 400°

Dans la zone thermique de travail 0-300° à 400°, on obtient les résultats suivants

*Revenu préalable de 600°, zone de travail 0-400°*

Avec le type n° 1

A la température ordinaire $\left\{ \begin{array}{l} \Delta = 220 \\ \rho = 12 \end{array} \right.$

A 400° . $\left\{ \begin{array}{l} \Delta = 220 \\ \rho = 7 \end{array} \right.$

Avec le type n° 2

A la temperature ordinaire . . $\left\{ \begin{array}{l} \Delta = 320 \\ \rho = 12 \end{array} \right.$

A 400° $\left\{ \begin{array}{l} \Delta = 220 \\ \rho = 6 \end{array} \right.$

*Revenu préalable de 400°, zone de travail 0-300°*

Avec le type n° 1

A la température ordinaire $\left\{ \begin{array}{l} \Delta = 300 \\ \rho = 7 \end{array} \right.$

A 300° $\left\{ \begin{array}{l} \Delta = 280 \\ \rho = 6 \end{array} \right.$

*et dans la zone de travail 0-400°*

Avec le type n° 2

A la température ordinaire . . $\left\{ \begin{array}{l} \Delta = 420 \\ \rho = 11 \end{array} \right.$

A 300° . . $\left\{ \begin{array}{l} \Delta = 320 \\ \rho = 5 \end{array} \right.$

ce qui donne un choix des traitements thermiques suivant la température à laquelle doit être portée la pièce et les résultats à obtenir

5° *Aciers nickel-chrome auto-trempants.* — Ces aciers sont les seuls qui puissent être pris en considération pour des échauffements de 600° et plus, les aciers perlitiques précédemment étudiés n'étant pas réversibles après trempe

Les aciers auto-trempants, lorsqu'ils dépassent la température de trempe, reprennent, comme nous l'avons vu, leur constitution martensitique au refroidissement à l'air, ce qui assure la conservation théoriquement indéfinie de leur dureté

L'étude des aciers de cette famille à teneurs variables en carbone, nickel et chrome, conduit aux conclusions suivantes la teneur en chrome doit être superieure à *0,8 % et inférieure à 2 %*

La teneur en nickel doit être de 4 à 5 %

La teneur en carbone peut varier de 0,15 à 0,30 %; 0,30 % semble constituer un maximum, si l'on veut que l'acier ait une résilience suffisante

Nous pouvons donc faire un certain nombre de combinaisons, sans changer le caractère *auto-trempant* de l'acier.

Nous choisirons la combinaison

**Teneur maximum chrome**
**Teneur minimum carbone**

de préférence à la combinaison

**Teneur maximum carbone**
**Teneur minimum chrome.**

Nous avons en effet constaté que la dureté à chaud se maintient mieux ainsi, sans que l'acier soit fragile, étant donnée la faible teneur en carbone

Il faut éviter la combinaison

**Teneur maximum carbone**
**Teneur maximum chrome.**

qui, avec des difficultés d'usinage, engendre une trop grande fragilité, dans l'étendue de la zone thermique considérée

Dans ces conditions, nous obtenons, à l'échauffement à 600°, les caractéristiques suivantes

$$\Delta = 150$$
$$\rho = 14$$

c'est-à-dire que nous sommes dans les conditions recherchées, sans qu'en aucun point de la zone thermique les caractéristiques subissent un fléchissement dangereux

Pour les échauffements supérieurs aux températures critiques, la réversibilité est complète, et l'acier retrouve au refroidissement ses propriétés premières

Ces aciers ont a l'état doux une durete d'environ 270 qui en permet l'usinage

La considération des diagrammes (fig 92, 93, 94), relatifs aux types n^os^ 1, 2 et 3 d'acier nickel-chrome auto-trempant, nous montre que le type n° 2, qui a la composition genérale suivante

$$\begin{aligned} Ni &= 5 \pm 0,5 \\ Cr &= 1,6 \text{ à } 2 \\ C &= 0,15 \text{ à } 0,30 \end{aligned}$$

est celui qui satisfait le mieux aux conditions

Les types n^os^ 1 et 3 sont plus fragiles que le type n° 2, dont la résilience est supérieure à 8 dans toute l'étendue de la zone thermique

Après revenu de 600°, les caractéristiques de cet acier sont

| | |
|---|---|
| A la temperature ordinaire . . | $\Delta = 300$, $\rho = 10$ |
| A 400° . . . . . . . . . . | $\Delta = 260$, $\rho = 10$ |
| A 600°. . . . . . | $\Delta = 150$, $\rho = 14$ |

Pour des échauffements faibles (300° par exemple), il suffit de faire revenir au préalable à cette température d'échauffement 300°, et l'on obtient dans la zone thermique 0-300°

| | |
|---|---|
| A la température ordinaire. . . . . | $\Delta = 420$, $\rho = 7$ |
| A 300° . . . . . . . . . . . . . . | $\Delta = 400$, $\rho = 6$ |

ce qui montre l'intérêt que présentent ces aciers aussi bien pour les faibles échauffements que pour les violents échauffements.

6° *Aciers chrome-tungstène.* — Après avoir exclu les aciers perlitiques chrome-tungstène intéressant peu l'aéronautique, les aciers

martensitiques comme inusinables, nous avons étudié les aciers chrome-tungstene à carbure double Cette dernière catégorie d'aciers a été également exclue à la suite de cette étude, étant donné

1° La difficulté d'obtenir l'état doux correspondant à un usinage facile,

2° La grande fragilité de ces aciers à toutes les températures

*Résumé* — On peut résumer commodément les résultats dans les trois tableaux suivants, dans lesquels nous avons élimine les aciers et les traitements donnant une résilience inférieure à 6, après avoir rangé dans chaque tableau les aciers d'après l'ordre de dureté.

Ces tableaux sont relatifs

1° Au travail à la temperature ordinaire,
2° Au travail dans la zone 0-400°;
3° Au travail dans la zone 0-600° et au-dessus

TABLEAUX

I Travail à la température ordinaire

| VALEURS de Δ approximatives | SPÉCIFICATION DE L'ACIER | RÉSILIENCES |
|---|---|---|
| 500 | Acier nickel-chrome perlitique, type n° 2, revenu 250° | 8 |
| 450 | Acier nickel-chrome perlitique, type n° 2, revenu 350° | 11 |
| 400 | Acier nickel-chrome perlitique, type n° 2, revenu 425° | 12 |
| 350 | Acier nickel-chrome perlitique, type n° 2, revenu 500° | 12,5 |
| | Acier nickel-chrome auto-trempant, type n° 2, revenu 525° | 6 |
| | Acier demi-dur trempé, revenu 300° | 6 |
| 300 | Acier nickel-chrome perlitique, type n° 2, revenu 500° | 13 |
| | Acier nickel-chrome auto-trempant, type n° 2, revenu 600° | 10 |
| | Acier demi-dur trempé, revenu 500° | 10 |
| | Acier nickel perlitique, revenu 600° | 8 |
| | Acier nickel-chrome, type n° 1, revenu 400° | 7 |
| 250 | Acier nickel-chrome perlitique, type n° 2, revenu 600° à 800° | 13 |
| | Acier nickel-chrome perlitique, type n° 1, revenu 525° | 12 |
| | Acier au carbone demi-dur, revenu 550° | 12 |
| | Acier au nickel perlitique recuit | 9 |
| 200 et au-dess. | Aciers demi-doux, doux, extra-doux et aciers types de cémentation | > 15 |

II Travail dans la zone thermique 0-400°

| VALEURS de Δ à 0° | VALEURS de Δ à 400° | SPÉCIFICATION DE L'ACIER | RÉSILIENCE à 0° | RÉSILIENCE à 400° |
|---|---|---|---|---|
| 420 | 380 | Acier nickel-chrome auto trempant, n° 2, revenu à 400° | 6 | 6 |
| 420 | 320 | Acier nickel-chrome perlitique, n° 2, revenu 400° | 11 | 6 |
| 360 | 280 | Acier nickel-chrome perlitique, n° 2, revenu 500° | 11 | 7 |
| 320 | 250 | Acier nickel-chrome auto-trempant, n° 1, revenu à 600° | 6 | 6 |
| 300 | 220 | Acier nickel-chrome perlitique, n° 2, revenu 600° | 13 | 10 |
| 300 | 280 | Acier nickel-chrome perlitique, n° 1, revenu à 400° | 7 | 5 |
| 300 | 240 | Acier demi-dur, revenu 500° | 10 | 6 |
| 300 | 220 | Acier nickel perlitique, revenu 600° | 8 | 6 |
| 220 | 210 | Acier nickel-chrome perlitique, n° 1, revenu 600° | 12 | 7 |
| 220 | 180 | Acier demi-dur, revenu 600° | 13 | 7 |

III Travail dans la zone thermique 0-600°

| VALEURS de Δ à 0° | VALEURS de Δ à 400° | SPÉCIFICATION DE L'ACIER | RÉSILIENCE à 0° | RÉSILIENCE à 600° |
|---|---|---|---|---|
| 320 | 150 | Acier nickel-chrome auto-trempant, type n° 1, revenu à 600° | 7 avec minimum ρ = 4 à 500° | 14 |
| 300 | 150 | Acier nickel-chrome auto-trempant, type n° 2, revenu à 600° | 10 | 14 |
| 220 | *100* | Acier nickel-chrome perlitique, type n° 1 | 13 | 11 |

NOTA — Au delà de 600°, faire appel aux aciers nickel-chrome, type n° 2, concurremment avec les aciers polyédriques au nickel à 32 % de nickel, dont nous avons cité les avantages et les inconvénients chapitre XXII, § 2)

Nous pouvons ainsi exercer un choix motivé de l'acier suivant la nature du travail, la zone thermique dans laquelle ce dernier s'effectue et la prépondérance qu'il y a lieu d'accorder soit à la resilience, soit à la dureté

Les diagrammes des aciers spéciaux donnés aux chapitres XXII et XXIII ainsi que les analyses chimiques de chaque acier étudié, permettent de préciser quantitativement et qualitativement les aciers ternaires et quaternaires mentionnés dans les tableaux precedents, et de trouver facilement dans l'industrie les aciers qui, sous des marques conventionnelles, possèdent des qualités similaires

On pourra ainsi fixer, a bon escient, dans les cahiers des charges, les conditions exigées du metal, comme composition chimique, dureté et résilience

On devra, de ce fait, obtenir les résultats suivants

1° Diminuer dans de grandes proportions l'usure des diverses pièces de moteurs, étant donné la durete que l'on obtient pour toute la zone de températures, par un choix judicieux du metal,

2° Éviter les ruptures toujours très graves par suite de l'existence dans toute la zone thermique d'une résilience suffisante

On dotera ainsi toutes les pièces des moteurs de deux qualites primordiales *sécurite* et *duree*

## TITRE XI

### CHAPITRE XXIV

### APPLICATION DES NOTIONS PRÉCÉDENTES A L'ÉTUDE ANALYTIQUE D'UN ACIER SPÉCIAL

Nous prendrons comme exemple un acier pour vilebrequins d'aviation et étudierons successivement les points suivants

A) Caracterisation de la matiere première

B) Transformation de cette matiere premiere (Forgeage et matriçage)

C) Traitement thermique

D) Vérification des caracteristiques mécaniques

E) Tensions résiduelles

F) Conclusions

#### A) Caractérisation de la matière première

Le cahier des charges communes du 1$^{er}$ juillet 1918 relatif à la fourniture des produits sidérurgiques destines à l'aeronautique définit les caractéristiques des aciers destinés aux vilebrequins d'aviation, aciers 32 et 33 d'une part et acier 34 d'autre part du tableau standard n° 1 annexé à ce cahier

L'acier 32 est l'acier nickel-chrome nuance demi-dur

L'acier 33 est l'acier nickel-chrome nuance dur

L'un et l'autre sont perlitiques, quoique l'acier 33 soit un acier limite, déjà auto-trempant si on se rapproche, simultanément pour le carbone, le nickel et le chrome, des teneurs maximum.

L'acier 34 est nettement auto-trempant et peu employé pour les vilebrequins Nous n'en ferons pas une étude spéciale

Caractérisation de l'acier 32 — L'acier 32 est ainsi caractérise

1° Composition chimique moyenne (à titre d'indication)

C — 0,28 a 0,35
Ni — 2,50 a 2,80
Cr — 0,70
Mn — 0,40
Si — 0,20 a 0,30
S max — 0,04 } constituant des conditions
P max — 0,04 } de reception

2° Propriétés mécaniques :

Après trempe a l'huile de 820° à 850° et revenu convenable de barreaux d'essais définis au titre I (art. 5 et 6) du cahier des charges précité

R $\geqslant$ 80
E $\geqslant$ 70
A% min 12
ρ min 13

Caractérisation de l'acier 33 — L'acier 33 est ainsi caractérisé

1° Composition chimique moyenne (à titre d'indication)

C — 0,30 à 0,35
Ni — 3 à 3,50
Cr — 1 a 1,50
Mn — 0,25
Si — 0,30
S max — 0,04 } constituant des conditions
P max — 0,04 } de réception

2° Propriétés mécaniques :

Après trempe à l'huile de 800° à 850° et revenu convenable de barreaux d'essais définis au titre I (art. 5 et 6) du cahier des charges précité

R $\geqslant$ 90
E $\geqslant$ 75
A% min 12
ρ min 12

COMPARAISON ENTRE L'ACIER 32 ET L'ACIER 33 POUR LA FABRICATION DES VILEBREQUINS — Un avantage des aciers du type 33 consiste dans ce fait que les propriétés R et E recherchées peuvent être suffisantes même apres un revenu assez élevé, 650°

Ce revenu eleve rapproche l'acier de l'état recuit (environ 50° au-dessous de $A_1$)

Or, c'est très légèrement au-dessous de $A_1$ que les resiliences ont leur plus grande valeur, alors que le maximum des allongements a lieu vers $A_3 + 50$

D'une façon genérale, avec les aciers 32 les R et les E sont insuffisants à cette température de revenu

Pour ceux-là on s'en tient donc a un revenu moindre (550-600°) qui ne coincide pas avec le maximum des resiliences

Quoi qu'il en soit, c'est sur l'acier 32 que cette etude methodique est poursuivie, étant donné l'emploi considérable qui a ete fait de cet acier pour la fabrication des pièces de moteurs d'aviation

## B) Transformation de la matière première (forgeage, matriçage).

MATRIÇAGE — Le découpage a chaud ou a froid doit être absolument proscrit.

Il occasionne une rupture des fibres du metal et cree dans les

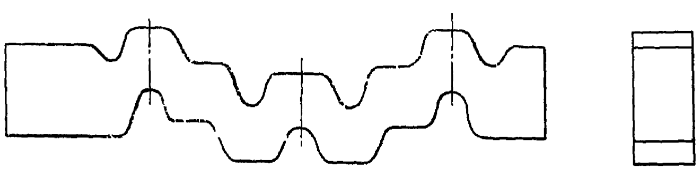


Fig 98.

bras des travers dangereux qui ne permettraient pas les caractéristiques minimum exigibles

Les macrographies 1 et 2 (pl XVI) et 3 et 4 (pl XVII) donnent respectivement l'aspect d'un élément de vilebrequin découpé en plateau et celui d'un élément de vilebrequin matrice.

On voit, d'une part (nos 1 et 2), le sectionnement des fibres, à l'aplomb des manetons et des bras et, d'autre part (nos 3 et 4),

l'incurvation de ces fibres suivant sans rupture les sinuosités du tracé de l'arbre

Le vilebrequin sera donc en général amené par un matriçage

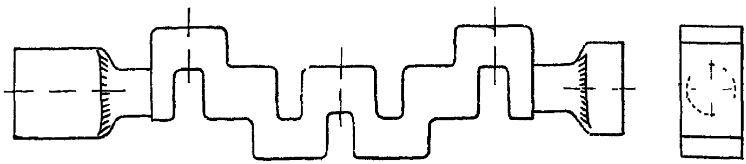


Fig 98

de champ à posséder les sinuosités dans lesquelles s'inscriront les coudes (Voir fig 87)

A ce matriçage de champ ou cambrage succéderont en général deux passes de matriçage à plat (Voir fig 88)

Décalage des plans axiaux des coudes Torsion a éviter — Les opérations précédentes sont relativement simples quand il s'agit de vilebrequins à quatre coudes dans lesquels le plan axial de chaque coude coïncide avec le plan axial des autres coudes

Dans les vilebrequins à six coudes, les plans axiaux des coudes ne coïncident pas entre eux et il y a des décalages de 30°, 60° ou 120°

A la suite de l'opération de cambrage, ces décalages ne sont pas amorcés

Il y a lieu de demander aux matriçages consécutifs au cambrage, l'orientation relative de ces coudes

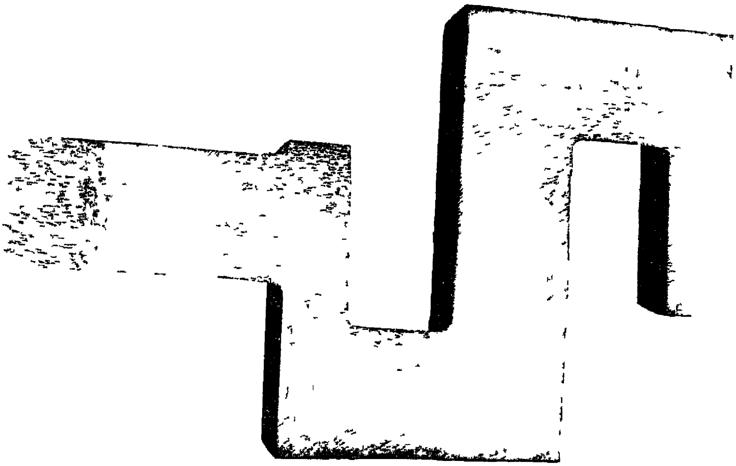
Le cahier des charges relatif à la réception des arbres manivelles s'exprime ainsi

« Les torsions, s'il en est, devront être obtenues par forgeage et les *angles de torsion* seront réduits à 60° par des opérations de forgeage ou de matriçage appropriées »

La torsion, c'est-à-dire l'opération consistant à faire tourner à chaud un coude autour des deux portées voisines, est donc sinon absolument interdite, du moins nettement délimitée.

Cette torsion change l'orientation des fibres du métal et diminue dans la longueur, c'est-à-dire parallèlement à la fibre moyenne, la résilience de la portée intéressée

Les figures 89 et 90 donnent l'aspect d'un vilebrequin à six

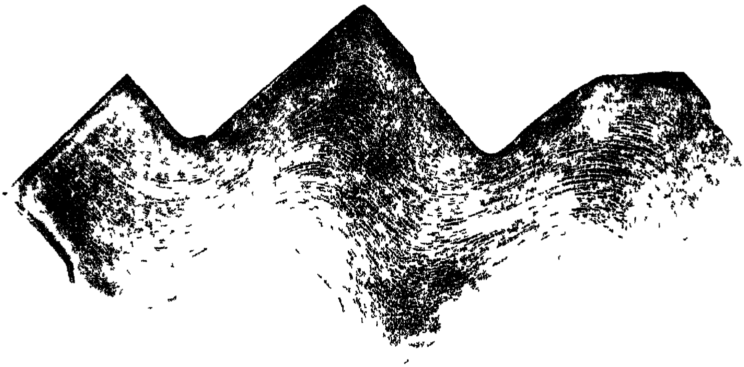


1

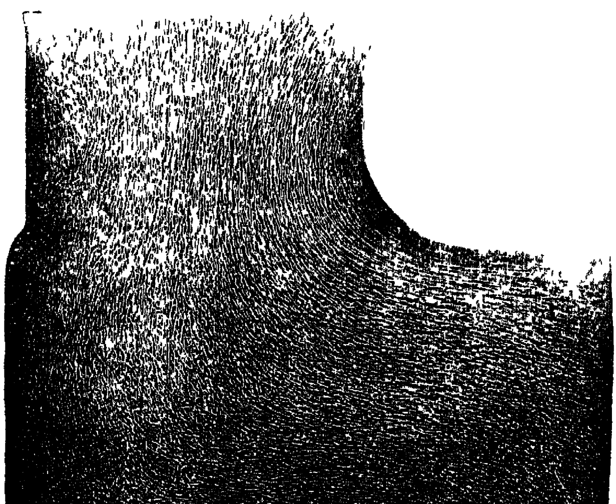


2

PLANCHE XVI



3



4

Planche XVII

coudes brut de forge dans lequel on voit sur les portées l'orientation hélicoïdale des fibres dues à la torsion



Fig 100

Or, il a été constaté que des ruptures ont eu lieu dans les portées tordues qui en long avaient des résiliences nettement insuffisantes,



Fig 101

malgré le petit supplément de résilience donné en travers par la torsion

## C) Traitements thermiques.

Après l'estampage ou matriçage, nous nous trouvons en présence d'un arbre qui possède toutes les tensions dues à ce mode de forgeage

Le but final à poursuivre est le suivant

Obtenir, *après traitement thermique*, un arbre possédant, d'une part les caractéristiques mécaniques recherchées et, d'autre part, un minimum de tensions résiduelles (tensions de forgeage, tensions de trempe)

L'idéal serait d'obtenir après ces traitements un métal abso-

lument inerte, c'est-à-dire se trouvant dans un état d'équilibre moléculaire parfait permettant d'éviter les déformations ou transformations pendant l'usinage et postérieurement à l'usinage

Les caractéristiques mécaniques à obtenir sont définies au cahier des charges du 1er juillet 1918 relatif à la fourniture des arbres manivelles pour moteurs destinés à l'aéronautique (Voir annexe no 2 )

Elles seront étudiées

Ajoutons que la *texture fibreuse* caractéristique des hautes résiliences est indispensable à obtenir, ce qui est loin de diminuer les difficultés du problème à résoudre comme nous le verrons ultérieurement

### 1° *Traitement après forgeage*

Les tensions de forgeage doivent être détruites avant la trempe au moyen d'un traitement thermique approprié

Nous avons défini la zone de forgeage au titre V, chapitre VII

Théoriquement, en appelant T la température du point critique $A_c$, elle se circonscrit dans l'intervalle

$$\begin{array}{l} T + 200 \\ T - \ \ 50 \end{array}$$

Pour les aciers 32 et 33, nous avons pratiquement les intervalles 1 000° — 800°

Au point de vue de la réduction des tensions de forgeage, on a intérêt à ne pas descendre trop près de la limite inférieure de cette zone

On peut même admettre une température de forgeage au-dessus de 1000° si l'on prête la plus grande attention à se maintenir au-dessous de la température de ségrégation de façon à éviter toute altération du métal.

On peut ainsi concevoir, dans le but de diminuer les tensions dues au travail à chaud, une série d'opérations consistant à chauffer la pièce vers 1200°, la forger dans l'intervalle 1200° — 950°, puis la reporter au four pour remonter la température de 950° à 1200°, etc .

en n'utilisant qu'un intervalle où le métal possede son maximum de malléabilité, et en realisant par surcroît une economie de combustible, la somme des calories à fournir à la pièce de forge étant ainsi réduite

Cela exige évidemment une très grosse surveillance des temperatures et un dressage du personnel tout à fait soigné

Quoi qu'il en soit, la pièce de forge après le travail au laminoir, au pilon ou à la presse, possédera un *écrouissage* plus ou moins grand suivant le processus adopté dans le travail de forge et une *surchauffe* résultant de la température maximum a laquelle s'est effectué ce travail.

La trempe, comme nous l'avons vu au titre VIII, chapitre XV, remédiera à la surchauffe

Reste à la conduire de façon à réduire dans la mesure du possible les tensions résiduelles qu'elle fait naître

En tout cas, avant d'y procéder, il faut détruire les tensions de forgeage pour qu'il n'y ait pas superposition des tensions residuelles dues à ces deux causes, ce qui occasionnerait ulterieurement de graves inconvénients.

Ce traitement thermique peut être un recuit d'adoucissement c'est-à-dire un chauffage à T + 50 opéré dans les conditions definies au titre VIII, chapitre XI

Ce traitement comporte un refroidissement relativement rapide

Il améliore ainsi la texture et, en réalite, attenue les tensions de forgeage Mais, il faut bien se dire que les deux résultats ne peuvent être obtenus simultanément (destruction des tensions, amelioration de la texture), et dans leur intégralité par une seule opération thermique, une même température de chauffage et une même vitesse de refroidissement n'étant pas susceptibles d'apporter une solution complète à deux questions aussi différentes

Or étant donné qu'ultérieurement la trempe suivie de revenu se chargera de porter un remède complet à la surchauffe, il semble que si l'on veut poursuivre au préalable la destruction des tensions de forgeage, le traitement régénérateur à préconiser soit le *recuit de stabilisation*, à savoir

Porter la pièce à une température se rapprochant des températures de forgeage, c'est-à-dire à une température plus elevée que celle définie pour le recuit (T + 50) (environ 800°), adopter par exemple T + 200 (environ 950°) et laisser refroidir la pièce très

lentement, de façon à permettre la réalisation de l'equilibre mécanique interne

Sans doute après ce traitement l'acier aura une structure cristalline Il sera fragile, mais il possédera une certaine inertie, il sera détendu La trempe précédée ou non d'un recuit donnera à ce métal débarrassé des tensions résiduelles de forgeage les caractéristiques mécaniques recherchees

### 2° *Trempe.*

La technique complète de la trempe donne lieu aux recherches suivantes

*a*) Détermination des courbes à l'échauffement et au refroidissement avec différentes vitesses de refroidissement,

*b*) Influence de la température de trempe sur la dureté superficielle,

*c*) Influence de la pénétration de la trempe sans revenu,

*d*) Effets de la penétration de la trempe après revenu,

*e*) Influence des traitements thermiques successifs sur la resilience.

Ces recherches ont été faites à l'Inspection technique des Produits Métallurgiques de l'aviation (1) sur un acier n° 32 ayant la composition suivante

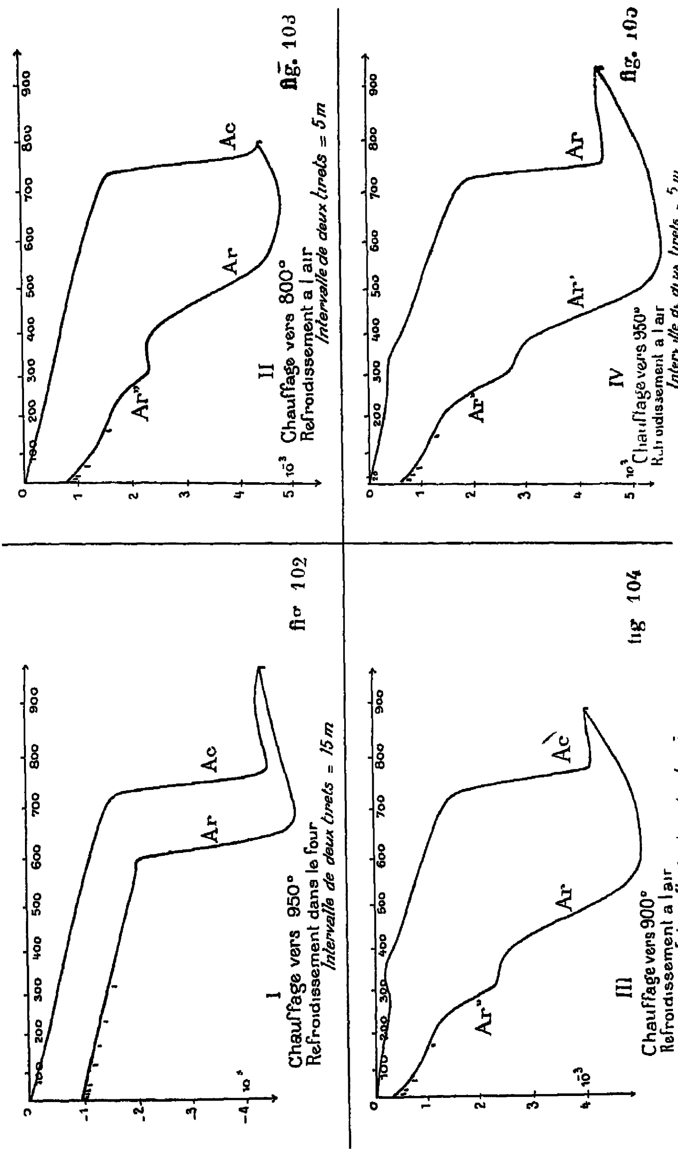
| | | |
|---|---|---|
| C | = | 0,30 |
| Ni | = | 2,60 |
| Cr | = | 0,77 |
| Mn | = | 0,25 |
| Si | = | 0,27 |
| S | = | 0,02 |
| P | = | 0,02 |

Les différents résultats sont consignés ci-après

*a*) Détermination des courbes a l'échauffement et au refroidissement avec différentes vitesses de refroidissement — Les points de transformation ont été déterminés aux aciéries d'Imphy par M Chevenard par enregistrement photographique, à l'échauffement et au refroidissement, des variations

(1) Section des laboratoires, lieutenant Portevin.

## ACIER 32 (C=0,30 Ni=2,60, Cr=0,77, Mn=0,25)




La vitesse de refroidissement est indiquée par des tirets graduant la courbe

de longueur de petits barreaux d'acier au moyen du dilatomètre différentiel

Le refroidissement s'opérait soit dans le four pour la courbe I (fig 102), soit à l'air libre pour les courbes II, III et IV (fig 103, 104 et 105)

Dans tous les cas, la loi du refroidissement est connue et indi-

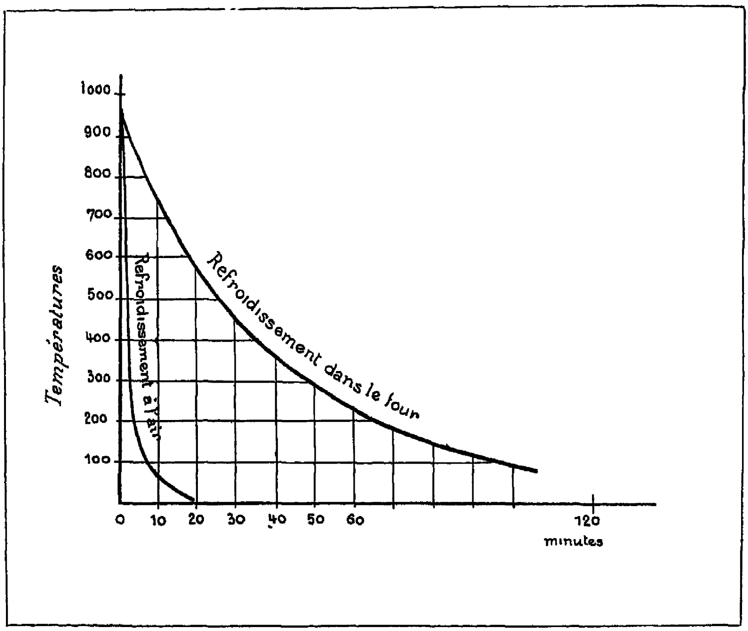



Fig 106

quée par de petits tirets accompagnant la courbe de refroidissement et qui s'inscrivaient toutes les quinze minutes lors du refroidissement lent dans le four, ou toutes les cinq minutes lors du refroidissement rapide à l'air

Ces deux procédés de refroidissement correspondent à des lois de refroidissement représentées graphiquement par les courbes moyennes suivantes (fig 106)

Dans le premier cas, l'intervalle 700 — 100 est franchi en un temps T = 1$^{h}$ 30 environ

Dans le deuxième cas, l'intervalle 700 — 100 est franchi en un temps T = 6 minutes

*Conclusions* — Par refroidissement dans le four avec T = 1 h 30 l'acier est réversible même lorsque la température de chauffage atteint 950° (hystérésis de transformation 150°)

Il sera adouci par un recuit industriel

La température limite inférieure de chauffage avant trempe est 780°

Une limite inférieure de la température de sortie du four avant trempe est 670°

Par refroidissement à l'air avec T = 6′ il y a dedoublement (Ar′ — Ar″) du point de transformation au refroidissement lorsque la temperature de chauffage varie de 800° à 950°

Il y a trempe partielle (martensite, troostite), ceci est montre par les anomalies à l'échauffement que l'on peut constater vers 300 — 350° sur les courbes III et IV tracees posterieurement a un refroidissement a l'air de l'éprouvette

Il n'y aura pas de trempe à l'air au centre des pièces moyennes, mais la pénétration de la trempe pour ces pieces sera variable suivant qu'il s'agit de l'eau ou de l'huile.

*b*) Influence de la température de trempe sur la durete superficielle de petits échantillons — La variation de la dureté, en fonction de la température de trempe, a la surface de petits echantillons, a été étudiée dans les conditions experimentales suivantes

Les échantillons découpés dans les barres de 20 mm de diamètre étaient des cylindres de 20 mm de diamètre et de 20 mm de hauteur

Ils ont été chauffes par dix minutes de séjour dans un bain de sel porté aux températures indiquées sur les diagrammes (fig 107 et 108) puis trempés à l'eau ou à l'huile

Après ce traitement, on déterminait la dureté à la bille (bille de 10 mm, charge de 3 000 kg) sur une des bases après avoir enleve à la meule le métal sur une épaisseur de o mm 5

*Résultats.* — Ils sont donnés par les diagrammes (fig 107 et 108)

# ACIER 32

## Influence de la température de trempe sur la dureté superficielle de petits échantillons

*Composition de l'acier* C = 0,30
Ni = 2,60
Cr = 0,77
Mn = 0,25

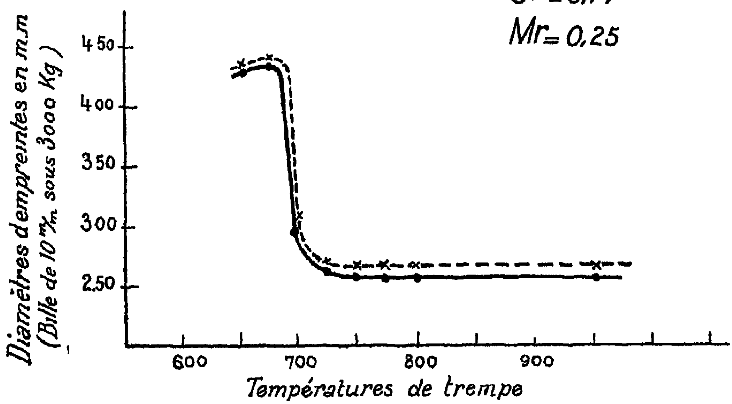



Fig 107

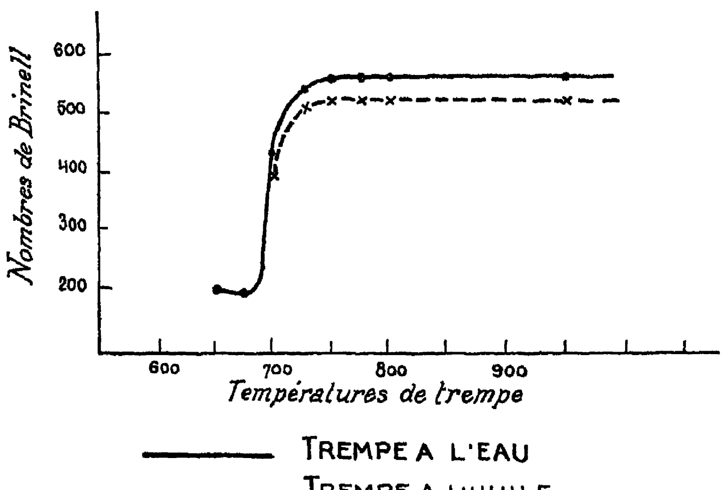



Fig 108

*c*) Influence de la pénétration de la trempe sans revenu. — Les essais ont été effectués sur des cylindres dont le diamètre se rapprochait de celui des vilebrequins

Diamètre = 70 mm
Hauteur = 3 D = 210
Temperature de trempe d'essai : 750, 800, 900
Bains de trempes eau et huile = 25°
Chauffage au bain de sel
Durée de chauffage 40 min

Les empreintes de bille ont été effectuées sur une section droite

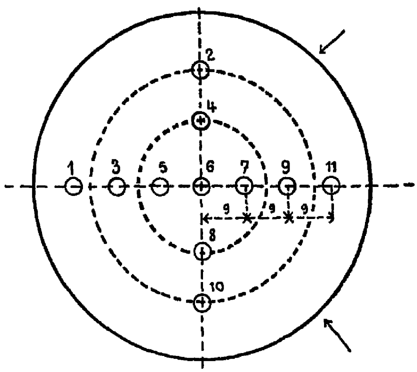



Fig 109

a mi-hauteur du cylindre, section dressée au lapidaire parallèlement aux bases des cylindres

Les emplacements des empreintes sur cette coupe sont indiqués (fig 109)

*Résultats* — Les tableaux (fig 110, 111, 112) résument les résultats.

1° Sauf dans la région avoisinant la surface (sur environ 10 mm d'épaisseur) la dureté pour la trempe à l'huile peut être regardée comme *uniforme et cela quelle que soit la température de trempe.*

Au contraire pour la trempe à l'eau, la dureté varie considérablement en profondeur, ce fait est particulièrement net aux températures de trempe élevées à 900°;

2° La dureté moyenne à la surface est sensiblement indépen-

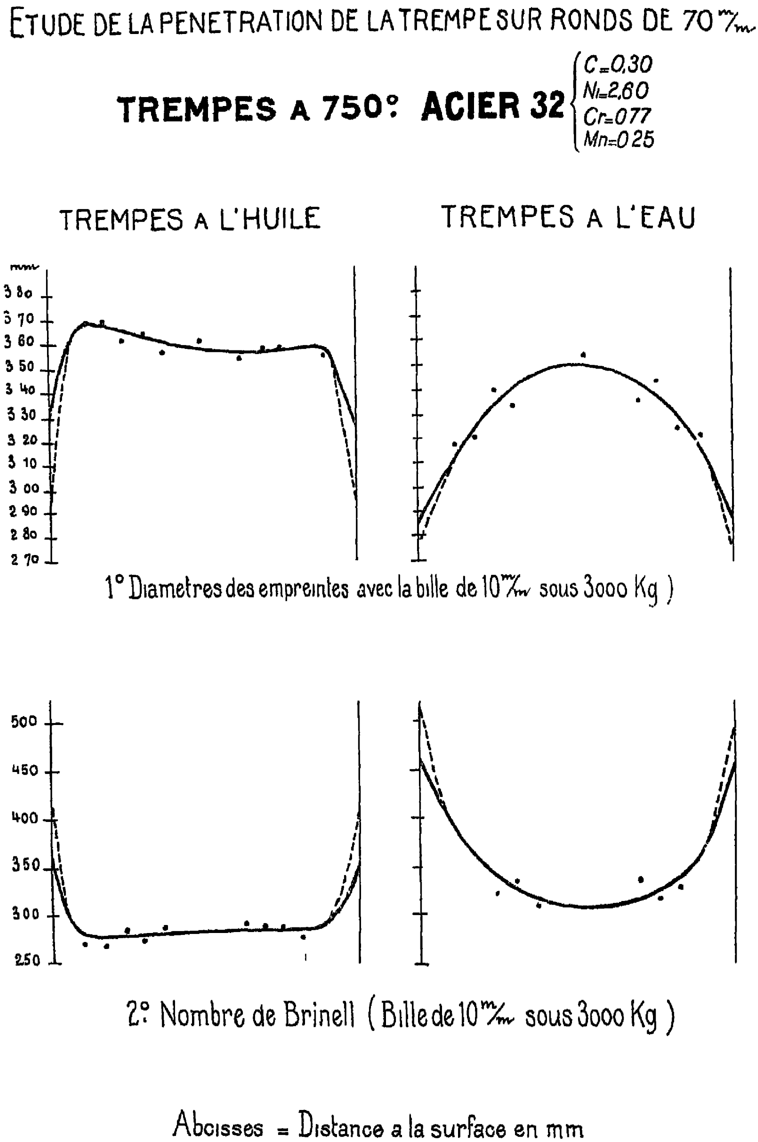

ETUDE DE LA PENETRATION DE LA TREMPE SUR RONDS DE 70 m/m
TREMPES A 750° ACIER 32
C=0,30
Ni=2,60
Cr=0,77
Mn=0,25
TREMPES A L'HUILE
TREMPES A L'EAU
mm
3 80
3 70
3 60
3 50
3 40
3 30
3 20
3 10
3 00
2 90
2 80
2 70
1° Diametres des empreintes avec la bille de 10 m/m sous 3000 Kg )
500
450
400
350
300
250
2° Nombre de Brinell ( Bille de 10 m/m sous 3000 Kg )
Abcisses = Distance a la surface en mm

Fig 110

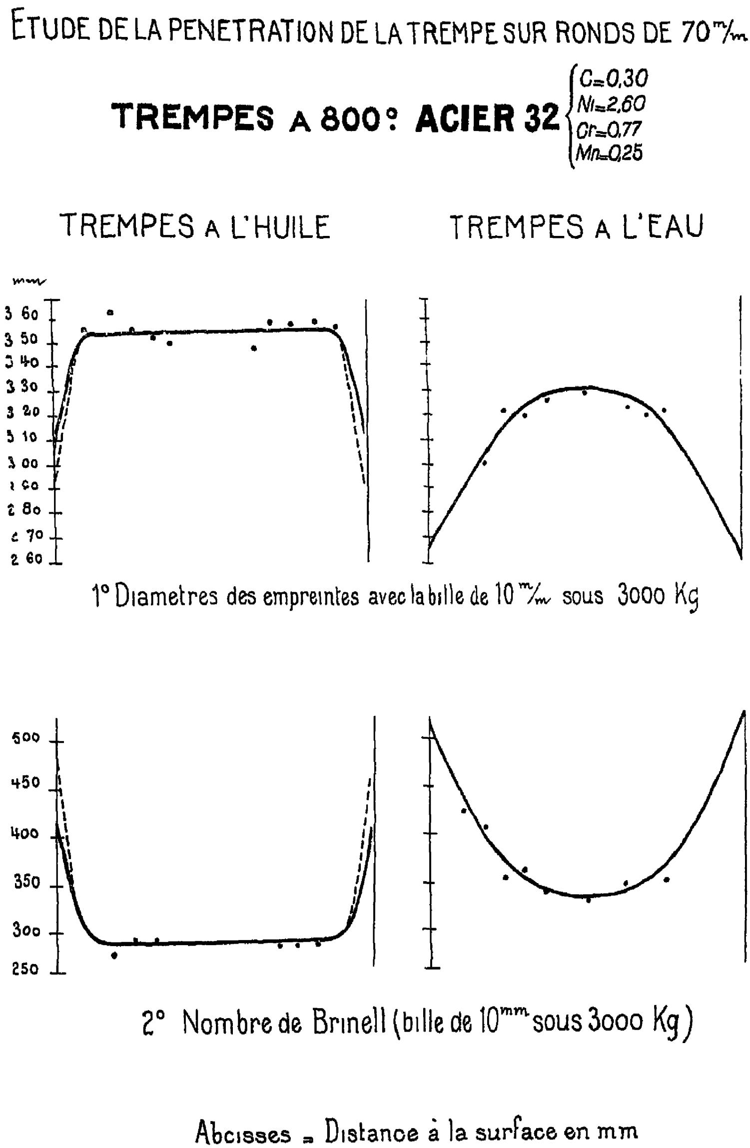

ETUDE DE LA PENETRATION DE LA TREMPE SUR RONDS DE 70 m/m
TREMPES A 800° ACIER 32
C=0,30
Ni=2,60
Cr=0,77
Mn=0,25
TREMPES A L'HUILE
TREMPES A L'EAU
mm
3 60
3 50
3 40
3 30
3 20
3 10
3 00
2 90
2 80
2 70
2 60
1° Diametres des empreintes avec la bille de 10 m/m sous 3000 Kg
500
450
400
350
300
250
2° Nombre de Brinell (bille de 10mm sous 3000 Kg)
Abcisses = Distance à la surface en mm

Fig 111

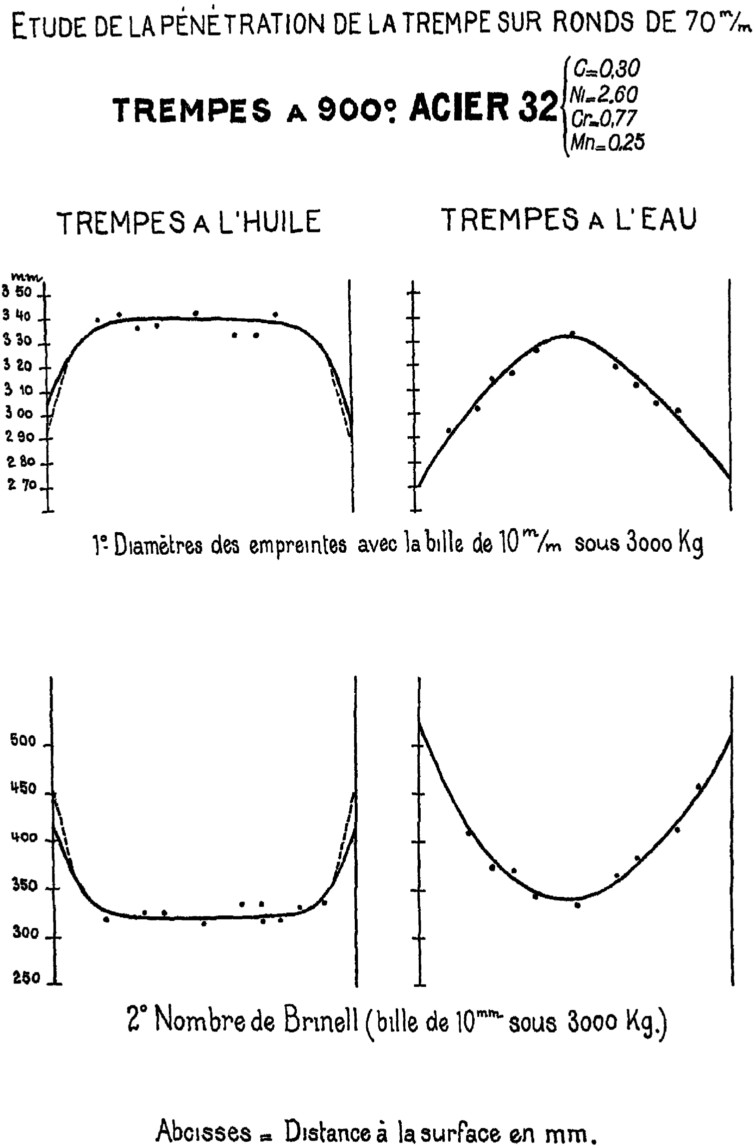

ETUDE DE LA PÉNÉTRATION DE LA TREMPE SUR RONDS DE 70 m/m
TREMPES A 900° ACIER 32
C=0,30
Ni=2,60
Cr=0,77
Mn=0,25
TREMPES A L'HUILE
TREMPES A L'EAU
mm
3 50
3 40
3 30
3 20
3 10
3 00
2 90
2 80
2 70
1° Diamètres des empreintes avec la bille de 10 m/m sous 3000 Kg
500
450
400
350
300
250
2° Nombre de Brinell (bille de 10mm sous 3000 Kg.)
Abcisses = Distance à la surface en mm.

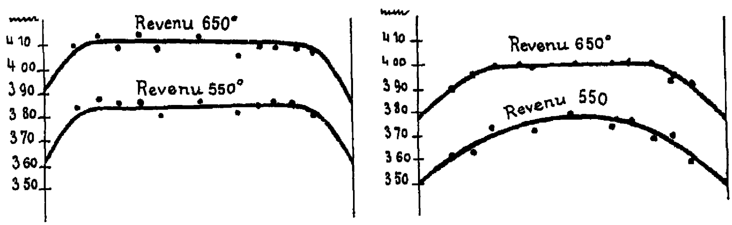
Fig 112

## EFFET DE LA PÉNETRATION DE LA TREMPE APRES LE REVENU

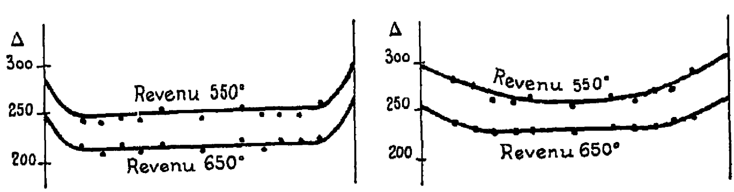
**ACIER 32** { C=0,30 ; Ni=2,60 ; Cr=0,77 ; Mn=0,25 }

## TREMPES A 800° ET REVENUS A 550 ET 650

TREMPES A L'HUILE — TREMPES A L'EAU




1° Diametres d'empreintes des billes (bille de 10 m/m, charge 3000 Kg)




2° Nombre de Brinell Δ

Abcisses Distance a la surface en mm

Fig 113

dante de la température de trempe, elle est un peu plus faible dans le cas de trempe à l'huile, elle est sensiblement la même d'ailleurs que celle obtenue dans les conditions de trempe a la surface de petits échantillons ayant fait l'objet des expériences précédentes,

3° La dureté moyenne au centre croît légèrement au fur et à mesure que la température de trempe s'élève

Notons que le facteur prépondérant est le *bain de trempe*, c'est-à-dire la vitesse *moyenne de refroidissement*

*d*) Effets de la pénétration de la trempe après revenu — *Conditions expérimentales* — On a utilise la moitié des cylindres ayant servi à l'étude de la pénétration de la trempe

La température de trempe était de 800°

Le bain de trempe était l'eau ou l'huile a 25°

Les revenus ont éte opérés a 550° et a 650° par sejour de 45′ au bain de sel *avec arrêt à l'eau.*

*Étude de la durete* — Elle a été effectuee par des empreintes de billes disposées comme il a été indiqué précédemment, sur la base correspondant à la coupe à mi-hauteur des cylindres de trempe de 210 mm de hauteur, après avoir enlevé préalablement le métal sur une épaisseur de 5 mm

Les tableaux (fig 113) résument les résultats

On voit que dans le cas de la trempe à l'huile, après usinage des pièces, c'est-à-dire après avoir fait tomber quelques millimètres sur la surface extérieure, la dureté est sensiblement homogène

Mais, au contraire, après la trempe a l'eau, il existe, même après usinage entre la surface et l'intérieur de la pièce, un ecart dans les diamètres d'empreinte d'environ 0 mm 15, c'est-a-dire de 20 a 30 unités Brinell

Cet écart de durete correspond pour la charge de rupture, si l'on admet comme première approximation le coefficient $K = \frac{R}{\Delta} = 1/3$, à une différence de 7 à 10 kg

*Étude de la résilience.* — Des éprouvettes Charpy entaille Mesnager, ont été découpées dans des demi-cylindres traités comme il a été dit, conformément au dessin d'emplacement ci-joint, soit 8 éprouvettes (fig 114).

Les résultats des essais au choc sont donnés dans le tableau

# Prélèvement des éprouvettes de choc Mesnager

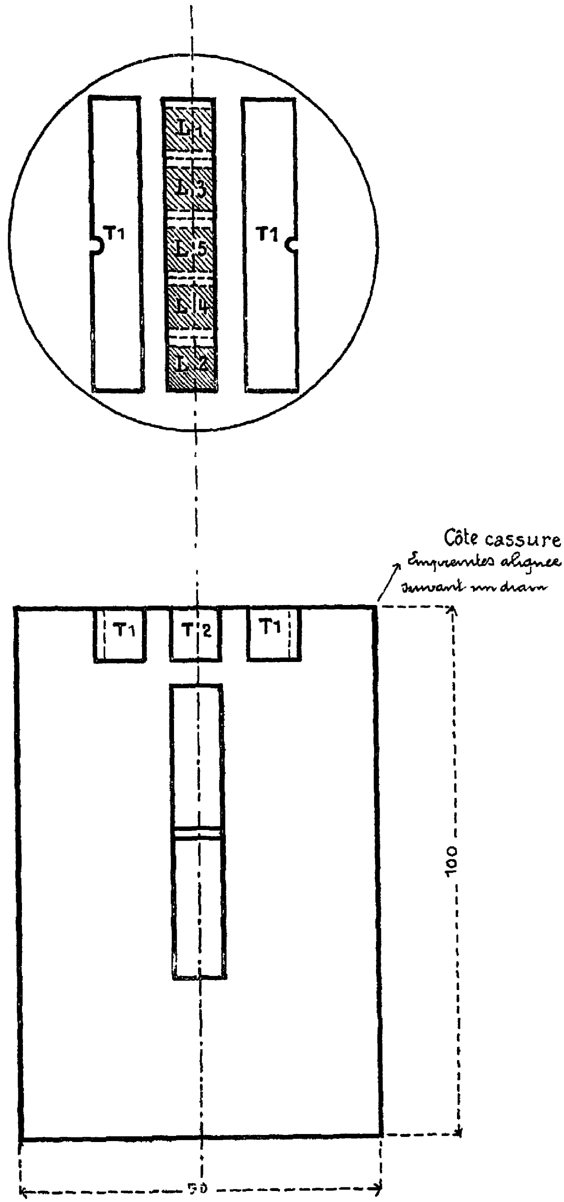



Fig 114

ci-après, ainsi que les moyennes des essais à la bille effectués sur les éprouvettes de choc (la charge agissant normalement à la longueur de l'éprouvette)

**Essais de résilience sur éprouvettes découpées à diverses profondeurs dans un cylindre de 70 mm après trempe et revenu**

(Voir les croquis donnant l'emplacement des eprouvettes d'après leur marque)

| NUMÉRO du cylindre | LIQUIDE de trempe | TEMPÉRATURE de revenu | MARQUE de l'éprouvette | SENS du prélèvement | RÉSILIENCE ρ | | ANGLE de rupture α | MOYENNE DE DURETÉ en diamètre d'empreinte *d* | MOYENNE DE DURETÉ en nombre de Brinell Δ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 5 | Huile | 550 | T 1 | Travers | 8,3 | 7,8 | 15 | 3,91 | 239 |
| | | | T 1 | | 7,6 | | 13 | | |
| | | | T 2 | | 7,6 | | 14 | | |
| | | | L 1 | Long | 11,8 | 12,7 | 18 | | |
| | | | L 2 | | 15,2 | | 22 | | |
| | | | L 3 | | 11,6 | | 21 | | |
| | | | L 4 | | 12,6 | | 18 | | |
| | | | L 5 | | 12,[illegible] | | 23 | | |
| 6 | Huile | 650 | T 1 | Travers | 12,2 | 11,6 | 17 | 4,29 | 197 |
| | | | T 1 | | 12,0 | | 25 | | |
| | | | T 2 | | 10,8 | | 20 | | |
| | | | L 1 | Long | 21,0 | 20,4 | 38 | | |
| | | | L 2 | | 20,4 | | 40 | | |
| | | | L 3 | | 20,4 | | 40 | | |
| | | | L 4 | | 19,4 | | 30 | | |
| | | | L 5 | | 20,6 | | 31 | | |
| 7 | Eau | 550 | T 1 | Travers | 7,6 | 7,8 | 15 | 2,80 | 255 |
| | | | T 1 | | 9,1 | | 15 | | |
| | | | T 2 | | 6,8 | | 13 | | |
| | | | L 1 | Long | 13,0 | 13,4 | 19 | | |
| | | | L 2 | | 15,0 | | 17 | | |
| | | | L 3 | | 13,0 | | 20 | | |
| | | | L 4 | | 13,0 | | 21 | | |
| | | | L 5 | | 13,0 | | 24 | | |
| 8 | Eau | 650 | T 1 | Travers | 12,2 | 12,1 | 23 | 4,15 | 212 |
| | | | T 1 | | 12,6 | | 23 | | |
| | | | T 2 | | 11,6 | | 19 | | |
| | | | L 1 | Long | 21,4 | 20,9 | 33 | | |
| | | | L 2 | | 21,4 | | 32 | | |
| | | | L 3 | | 19,6 | | 25 | | |
| | | | L 4 | | 20,5 | | 30 | | |
| | | | L 5 | | 21,4 | | 30 | | |

L'examen suggère les remarques suivantes

1° Pour un même sens de prélèvement long ou travers, la résilience peut être considérée comme peu influencée par la distance à l'axe ;

2° Si on compare les moyennes des résiliences en long et en travers pour un traitement déterminé, on trouve pour le rapport de la résilience en long ρL à la résilience en travers ρT

$$\frac{\rho L}{\rho T} = 1,6 \text{ à } 1,7$$

3° La trempe à l'eau fournit à égalité de dureté moyenne, une

DURETÉ ET RÉSILIENCE

Pièces de dimensions moyennes (d = 70 m/m)

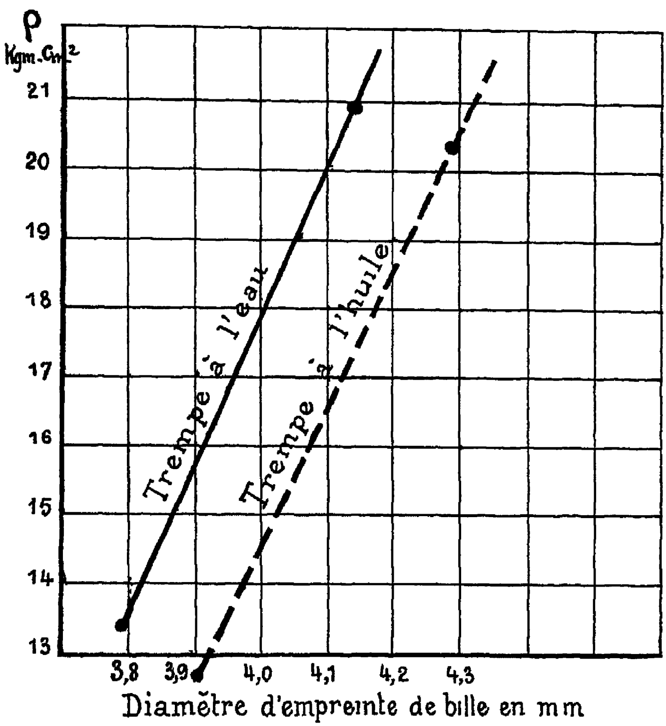



Fig 115.

résilience moyenne supérieure à celle obtenue par trempe à l'huile, ainsi que l'indique le diagramme (fig 115)

Cette supériorité de la trempe à l'eau au point de vue *résilience*

ne doit d'ailleurs pas faire oublier le risque plus grand de tapures de trempe (Voir nos 1, 2 et 3, pl XVIII, des exemples de tapures de trempe)

*e*) INFLUENCE DES TRAITEMENTS THERMIQUES SUCCESSIFS SUR LA RÉSILIENCE. — Il est à remarquer que la résilience est la caractéristique la plus affectée par les traitements thermiques successifs et c'est elle qui traduit le plus éloquemment et pour ainsi dire le plus « indiscrètement » les défaillances survenues au cours des différentes opérations thermiques effectuées en usine productrice

Considérons la série des traitements thermiques suivants

A) *Traitement stabilisateur à 900°*, à savoir

2 heures pour porter les pieces a 900°,
10 heures de maintien à 900°,
24 heures de refroidissement lent jusqu'à 200°.

B) *Recuit à 800°*, à savoir .

2 heures pour porter les pièces à 800°,
2 heures de maintien a 800°,
2 heures refroidissement a l'air

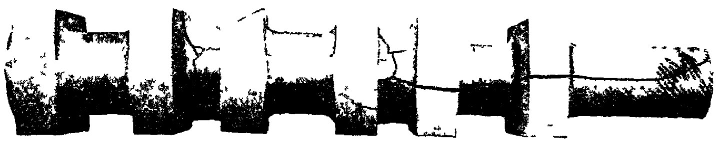
C) *Trempe à l'huile à 800°*, à savoir :

2 heures pour porter les pièces à 800°,
1 heure de maintien à 800°,
Trempe a l'huile

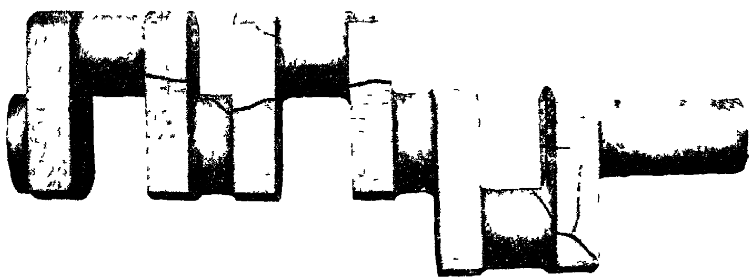
D) *Revenu à 650°* '

Chauffage lent à 500°,
Montée en 1 heure de 500° a 650°;
2 heures de maintien à 650°,
Refroidissement brusque

Ces traitements ont été appliqués à des pièces matricées en acier 32 ayant des dimensions analogues à celles des vilebrequins.



1



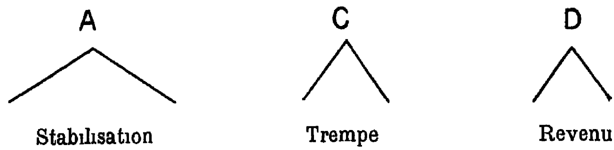
2



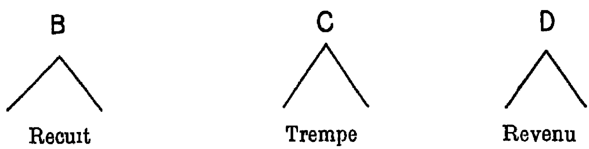
3

PLANCHE XVIII

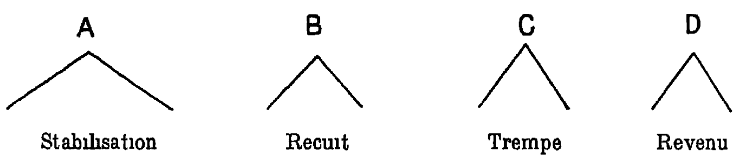
*Première série de pièces* — A subi les traitements




*Deuxième série de pièces* — A subi les traitements




*Troisième série de pièces.* — A subi les traitements




Des essais de résilience ont été faits sur toutes ces quatre séries de pièces après traitement final

*Résultat* — Première série 12 éprouvettes de résilience moyenne 12

Deuxième série 12 éprouvettes de résilience moyenne 8

Troisième série : 12 éprouvettes de résilience moyenne 13

*Conclusions* — La suite complète des traitements (3e série), à savoir

Traitement stabilisateur + recuit + trempe + revenu donne le maximum de résilience

Elle est donc à recommander malgré sa complication et le prix de revient plus élevé, si l'obtention de la résilience est à rechercher avant tout

Les traitements successifs : Traitement stabilisateur, trempe,

revenu, donnent un résultat légèrement inférieur mais acceptable avec économie d'un traitement (recuit).

Dans les première et troisième series le traitement *stabilisateur* caractérisé par une température de chauffe élevée et un refroidissement *très lent* permet d'aboutir à ce résultat satisfaisant Le métal s'est détendu à température elevée voisine de celle du travail de matriçage et le refroidissement très lent a permis la normalisation

Dans la deuxième série au contraire, où le recuit comportant un chauffage plus bas et un refroidissement rapide est utilise, les resiliences obtenues sont nettement insuffisantes

Le traitement stabilisateur a donc la plus heureuse influence

## D) Vérification des caractéristiques mécaniques E — R — A et ρ après trempe et revenu sur barreaux ronds de 20 mm de diamètre.

Les traitements ont été effectués sur barreaux ronds de 20 mm

EPROUVETTE POUR LA DETERMINATION DE LA LIMITE D ELASTICITE

3 Eprouvettes par nuance de metal

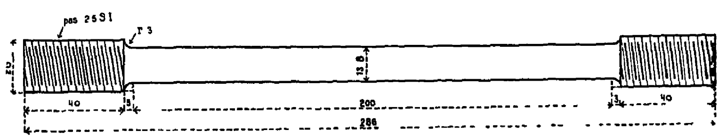


Fig 116

de diamètre dans lesquels ont été découpées après traitement complet les éprouvettes d'essais

Ces traitements sont les suivants

Trempe à l'eau après chauffage de quinze minutes au bain de sel à 825°.

Revenu suivi d'*arrêt à l'eau* après quinze minutes de chauffage au bain de sel

Température de revenu 550°, 600°, 650°

Les barreaux de traction de 13 mm 8 de diamètre étaient conformes au dessin (fig 116).

Ils possédaient une tête filetée de 200 mm de longueur calibrée de manière à pouvoir réduire tous les efforts de flexion parasite. La détermination de la limite élastique proportionnelle a été eflectuée par la méthode des miroirs de Martens (Voir les courbes figure 117), les éprouvettes étant d'ailleurs cylindrées à 1/100e près (1).

Les résultats dont chacun correspond à la moyenne de quatre déterminations sont indiqués dans le tableau ci-dessous

| TRAITEMENT | ESSAI DE TRACTION | | | | | | | ESSAI BRINELL (1) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Limite d'élasticité proportionnelle | Limite d'élasticité apparente | Charge de rupture | Allongements à la limite de proportionnalité | Allongements à la rupture | Striction | Module d'élasticité | Diamètre d'empreinte | Nombre de dureté | Résilience |
| | kg/mm² | kg/mm² | kg/mm² | % | % | % | 10³ kg/mm² | mm | kg/mm² | kg/cm² |
| Revenu à 550° | 81 | 89 | 97,5 | 0,40 | 14,6 | 22 | 20,3 | 3,47 | 307 | 17 |
| — 600° | 70 | 79,5 | 88,5 | 0,34 | 18,2 | 27 | 20,3 | 3,67 | 273 | 21,5 |
| — 650° | 66 | 76 | 86,5 | 0,32 | 17,3 | 25,5 | 20,7 | 3,73 | 264 | 23,5 |
| Recuit à 850° | 39 | 41 | 64 | 0,19 | 26,6 | 15,5 | 20,5 | 4,43 | 184 | 13 |

(1) Moyenne de quatre déterminations

OBSERVATIONS. — 1° Sauf dans le cas du recuit et du revenu à 550° après trempe, la limite d'élasticité apparente surpasse d'environ 10 kg/mm² la limite de proportionnalité définie comme il est dit plus haut.

2° Le module d'élasticité est sensiblement indépendant du traitement.

OBSERVATIONS. — *Limite élastique.* — Nous avons exposé dans le premier volume (titre II, chapitre VII, § 1), différentes conceptions de la limite d'élasticité.

Nous avons défini notamment la *limite d'élasticité proportionnelle*, c'est-à-dire la limite pour laquelle les déformations cessent d'être proportionnelles aux charges. L'évaluation de cette limite d'élasticité est éventuellement fonction de la sensibilité et de la précision de la mesure des allongements sous charge. C'est celle qui a été déterminée dans le cas présent par la méthode des miroirs de Martens. Les allongements sous charge étaient déterminés tous les 500 kg.

Nous avons envisagé également la *limite apparente d'élasticité*, qui correspond à une commodité de mesure (arrêt de la colonne de mercure, fléchissement du fléau de la machine, palier du dia-

(1) Mesures faites par M. le lieutenant Sabatié, chef de la section des Métaux du Conservatoire des Arts et Métiers.

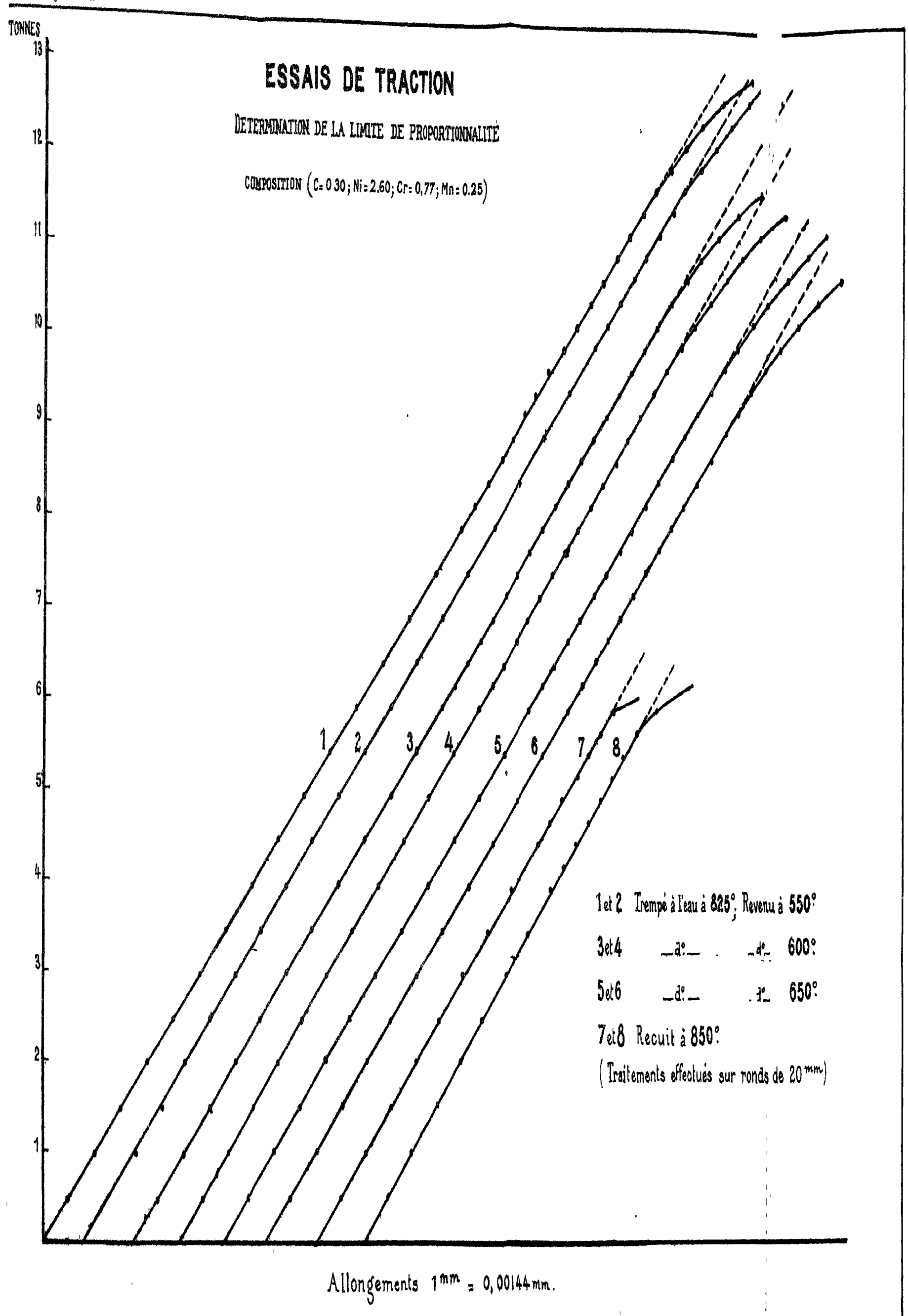
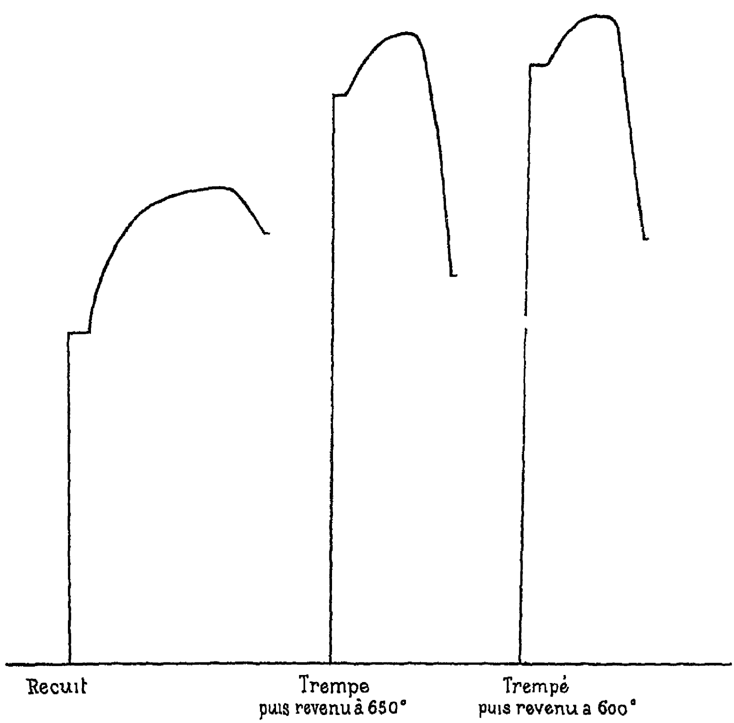

TONNES
13
12
11
10
9
8
7
6
5
4
3
2
1
ESSAIS DE TRACTION
DÉTERMINATION DE LA LIMITE DE PROPORTIONNALITÉ
COMPOSITION (C= 0.30; Ni= 2.60; Cr= 0,77; Mn= 0.25)
1
2
3
4
5
6
7
8
1 et 2 Trempé à l'eau à 825°, Revenu à 550°
3 et 4 d° d° 600°
5 et 6 d° d° 650°
7 et 8 Recuit à 850°
(Traitements effectués sur ronds de 20 mm)
Allongements 1 mm = 0,00144 mm.

Fig. 117.

gramme de traction) sans préjuger en rien de la signification exacte des causes qui motivent l'apparition de ce phénomène. Notons qu'en ce qui concerne les aciers 23, la limite élastique apparente




ACIER 32

Fig 118

était très nettement indiquée par des paliers ou des décrochements de la courbe déformations-charges enregistree par la machine de traction, voir figure 118

Quand il n'y a pas de palier dans la courbe du diagramme de traction (aciers durs, aciers trempés sans revenu, aciers écrouis) la recherche de la limite pratique d'élasticité s'impose On peut

également avoir recours à la recherche de la « limite d'élasticite proportionnelle ».

L'écart entre les limites élastiques apparentes et proportionnelles dans les conditions de détermination sus-exposées, ressort à environ 8 à 10 kg par millimètre carré pour les éprouvettes à 550, 600 et 650

En admettant que la limite d'*elasticite proportionnelle* soit suffisamment voisine de la *limite d'élasticité theorique* telle que nous l'avons définie au titre II, chapitre VII, § 1, du premier volume, il en résulte les conséquences suivantes pour l'acier 32

En exigeant 70 kg comme minimum de la limite apparente d'élasticité, on ne peut guère compter sur une limite élastique théorique ou vraie supérieure à 60 kg

Il n'est pas inutile d'attirer sur ce point l'attention des constructeurs pour que le taux de sécurité présumé ne soit pas illusoire et que la légèreté de la construction n'en compromette pas la solidité

En tous cas 70 kg semblent bien un minimum à exiger pour la limite élastique apparente si l'on ne veut risquer d'obtenir un taux de sécurité insuffisant et *ce minimum peut et doit être obtenu avec un acier 32 sans compromettre la valeur des autres caracteristiques*

*Résilience.* — La résilience minima à obtenir est de 10 dans la surlongueur et de 9 dans le corps *parallele à la fibre moyenne* (articles *b* et *c* du cahier des charges spéciales des arbres manivelles destinés à l'aéronautique du 1er juillet 1918).

Chaque vilebrequin est soumis à un essai de résilience dans sa surlongueur.

Les essais de dissection permettent de s'assurer que *parallèlement à la fibre moyenne* le minimum 9 de résilience est réalisé

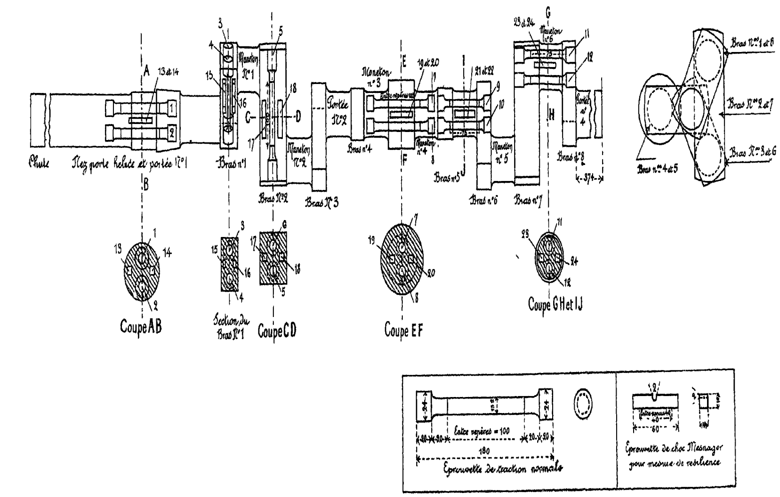
Ces essais sont faits d'après un plan de dissection

Les figures 1 et 2 de la planche encartée ci-contre donnent les plans de dissection relatifs à un vilebrequin 4 coudes d'une part et 6 coudes d'autre part.

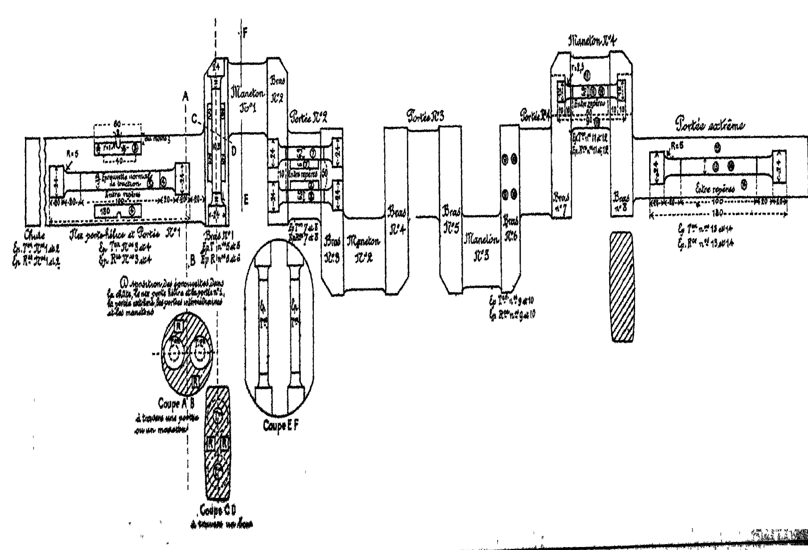
Il est évident que l'essai ne peut réussir que *pour les vilebrequins matricés après cambrage à l'exclusion de tout découpage*

Les éprouvettes de résilience n'épousent pas d'une façon parfaite la direction des fibres du métal, elles peuvent faire un certain angle avec ces fibres suivant le mode de forgeage adopté

## Prélèvement d'éprouvettes dans un vilebrequin à 6 coudes




## Prélèvement d'éprouvettes dans un vilebrequin à 4 coudes_



Nous avons vu au titre IV les variations de résiliences d'un acier 32 suivant l'obliquité de l'éprouvette avec la direction generale du laminage

Malgré le matriçage nous aurons donc des résiliences qui n'auront qu'une fraction de la valeur correspondant au sens du laminage Cette valeur réduite devra néanmoins être supérieure au minimum imposé

## E) Tensions résiduelles.

Nous avons dit précédemment que la conduite des traitements thermiques devait être telle qu'on obtienne en plus des caractéristiques mécaniques recherchées *la suppression des tensions de forgeage et la reduction au minimum des tensions de trempe.*

Nous avons indiqué le traitement thermique stabilisateur indispensable pour combattre les tensions de forgeage

Admettons ces tensions détruites par un traitement thermique adéquat

Restent les tensions de trempe et revenu

Quelle que soit la methode utilisée pour les déceler, les points suivants peuvent être notés

Effets de la trempe — *La trempe produit une variation des dimensions des aciers*

Elle met les couches externes en compression et les couches internes en tension Ces variations sont d'autant plus importantes que le métal est plus rapidement saisi, c'est-à-dire que la *vitesse de refroidissement* est plus grande

Donc variation plus grande pour la trempe à l'eau que pour la trempe à l'huile

D'autre part, l'augmentation de la teneur en carbone exagère ces effets de la trempe De toute façon, après trempe sans revenu, il y a des tensions internes plus ou moins importantes suivant la nature du bain de trempe et la nature du métal.

Effets du revenu. — Pour analyser les efforts internes résiduels après revenu consécutif à la trempe, on peut utiliser la méthode de Heyn et Bauer

Elle consiste à déterminer la valeur de ces efforts dans des couches

minces enlevées successivement à l'outil, en mesurant avec une grande précision les modifications de dimensions du solide restant

M Portevin (1) a utilisé ce procédé pour l'étude des efforts internes longitudinaux créés lors du refroidissement rapide par immersion dans l'eau de cylindres pleins de 70 mm de diamètre en acier nickel-chrome de composition

$$C = 0,3 \qquad Ni = 2,5 \qquad Cr = 0,7$$

trempé à 850° dans l'eau et revenu à

500° et 650°

Les efforts internes longitudinaux sont déterminés en mesurant les variations de longueur accompagnant l'enlèvement par tournage de couches annulaires minces

L'effort $f_n$ dans la couche de rang $n$ est donné par la formule

$$f_n = \frac{E}{l}\,\frac{\lambda_n S''_n - \lambda_{n-1} S_{n-1}}{S'_n}$$

E = module d'élasticité,
$\lambda_n$ = variation de longueur résultant de l'enlèvement de la couche de rang $n$,
$S'_n$ = section de la couche $n$,
$S''_n$ = section restante après enlèvement de la couche $n$,
$l$ = longueur de la région tournée

Les résultats obtenus sont les suivants

| | | Compression longitudinale périphérique moyenne sur 10 mm d'épaisseur<br>kg mm² | Extension longitudinale centrale moyenne sur 15 mm de diamètre<br>kg mm² |
|---|---|---|---|
| Revenu à 500° suivi de . . | refroidissement à l'air . | 3 | + 15 |
| | immersion dans l'eau. . | 11 | + 31 |
| Revenu à 650° suivi de . . | refroidissement à l'air . | 4 | + 10,5 |
| | immersion dans l'eau. . | 34,5 | + 49,5 |

(1) Voir *Comptes rendus à l'Académie des sciences*, titre CLXVII, page 531 (Séance du 7 octobre 1918)

On constate donc

1° La compression longitudinale des zones extérieures et l'extension longitudinale des zones intérieures

2° *L'exagération des variations de dimensions produite par l'arrêt à l'eau du revenu*

Les compressions et extensions radiales pourraient être étudiées également

Si donc l'on se propose comme but principal la réduction au minimum des *tensions*, le *refroidissement* à l'air après *revenu* s'impose et non le refroidissement rapide à l'eau ou à l'huile

Mais pour le cas particulier des aciers nickel-chrome, ce refroidissement lent ne procure pas la texture fibreuse et occasionne une fragilité excessive (Voir titre VI, chap 4, § 5)

On est obligé d'y renoncer et d'utiliser un revenu après trempe suivi de *refroidissement rapide*

On obtient la résilience On laisse subsister des tensions résiduelles assez élevées

Aussi, tandis que nous avons recherché la *suppression des tensions de forgeage*, ne nous sommes-nous proposé que l'*atténuation des tensions de trempe*

On peut néanmoins rechercher les conditions donnant le minimum de tensions avec la résilience indispensable

A ce point de vue, l'huile utilisée comme bain de trempe constitue une supériorité sur l'eau en donnant naissance à des tensions moindres

On peut encore chercher la diminution des tensions résiduelles par un nouveau revenu très prolongé (de l'ordre de une ou deux heures) à une température inférieure à 400° (soit 300°)

Ces tensions ne seront d'ailleurs pas totalement supprimées

Dans ces conditions, l'usinage de la pièce donnera lieu à des déformations qui nécessiteront un redressage ultérieur

Ce redressage s'effectuera à une température de 100° à 200° et pourra être utilement suivi d'un revenu prolongé vers 300° comme il a été précédemment indiqué

Comme on le voit, la solution du problème posé par les tensions résiduelles est des plus compliquées

Elle peut se trouver dans l'introduction de certains constituants spéciaux dans les aciers permettant d'annuler les déformations de la trempe

C'est une voie actuellement ouverte aux investigations des métallurgistes

### F) Conclusions.

Cette étude détaillée d'aciers très importants pour l'aviation a permis de mettre en évidence la suite des recherches qui s'imposent aux intéressés pour se faire une connaissance approfondie de la matière première employée, de manière à en obtenir le maximum de qualité et à l'employer de la façon la plus judicieuse

Ce programme de recherches peut s'appliquer, avec quelques variantes dépendant des conditions d'emploi, à tous les produits sidérurgiques

TITRE XII

# NORMALISATION DES PRODUITS SIDÉRURGIQUES

CHAPITRE XXV

## LES NORMES EN SIDÉRURGIE

Cette normalisation se traduit par l'établissement de normes ou tableaux Standard et par la rédaction de cahiers des charges normalisés

1° Tableau Standard français de l'Aéronautique — Les aciers sont divisés en *classes*, chaque classe comprenant des *catégories*

a) *Classes* — Sept classes d'aciers ont été établies, à savoir

Classe, n° 1, aciers ordinaires au carbone.
— n° 2, aciers au nickel,
— n° 3, aciers au nickel-chrome,
— n° 4, aciers au silicium,
— n° 5, aciers pour roulements,
— n° 6, aciers au tungstène et chrome-tungstène;
— n° 7, aciers nickel-chrome tungstène.

b) *Catégories*. — Chaque classe contient des catégories, le numéro de chaque catégorie s'inscrivant de 1 à 9 après le numéro de la classe. Les catégories sont rangées généralement par dureté croissante

# TABLEAU STANDARD DES ACIERS BRUTS EN BARRES

*(Les caractéristiques à l'état d'emploi sont définies*

| Numéros de catégorie | Désignations courantes appliquées | Traitement thermique d'essai | Caractéristiques mécaniques R | E | A % minimum | ρ minimum | Δ | C |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | | **Classe 1. — Aciers** |
| 10 | Acier de cémentation | Trempé à l'eau à 850° sans revenu . . . . | 50 ± 5 | ⩾ 28 | 20 | 22 | | ≤ 0.15 |
| 11 | Acier extra-doux | Recuit à 900°, trempé à l'air. . . . . . | 38 ± 4 | 24 ± 2 | 27 | | | 0.05 à 0.15 |
| 12 | Acier doux. . . . . | Recuit à 875°, refroidi lentement en air calme. . . . . . | 44 ± 4 | 26 ± 2 | 24 | | | 0 15 à 0.25 |
| 13 | Acier demi-doux | Recuit à 825°, refroidi en air calme. . . . | 50 ± 5 | 32 ± 2 | 20 | | | 0 25 à 0.40 |
| 14 | Acier demi-dur . . . | Recuit à 800°, refroidi en air calme. . . . | 60 ± 5 | 34 ± 2 | 16 | | | 0.40 à 0 60 |
| 15 | Acier dur . . . . . | Recuit à 780°, refroidi dans le four à 600°, portes du four ouvertes, puis lentement . . . . . . | 70 ± 5 | 40 ± 2 | 10 | | | 0 60 à 0 70 |
| 16 | Acier extra-dur. . . | Recuit à 750°, refroidi dans le four jusqu'à 600°, portes du four ouvertes, puis lentement . . . . . . | > 75 | | | | | 0.70 à 1.20 |
| | | | | | | | | **Classe 2. — Aciers** |
| 21 | Acier de cémentation | Trempé à l'eau à 850°, sans revenu . . . . | 60 + 10 − 5 | ⩾ 35 | 15 | 20 | | ≤ 0.12 |
| 22 | Acier à 6 % de nickel. | Trempé à 850°, sans revenu . . . . . . | 120 ± 10 | 100 ± 10 | 8 | 8 | | 0 07 à 0.20 |
| 23 | Acier à 23-25 % de nickel amagnétique | Trempé à l'eau ou recuit à 950° . . . . | Cahier des charges spéciales | | | | | |
| | | | | | | | | **Classe 3. — Aciers** |
| 31 | Acier nickel-chrome de cémentation. . | Après trempe à l'huile à 850° . . . . . . | ⩾ 85 | ⩾ 70 | 12 | 12 | | ≤ 0.12 |
| 32 | Acier nickel-chrome nuance demi-dur . | Trempé à l'huile, revenu à 600°-650°. . | ⩾ 85 | ⩾ 75 | 12 | 13 | | 0.28 à 0.35 |
| 33 | Acier nickel-chrome nuance dur. . . . | Trempé à l'huile, revenu à 600°-650° . | ⩾ 95 | ⩾ 85 | 12 | 10 | | 0 30 à 0.35 |
| 34 | Acier nickel-chrome trempant à l'air. . | Trempé à l'air à 900°. | ⩾ 165 | ⩾ 140 | 5 | 6 | | 0.25 à 0.40 |
| 35 | Acier à 30-33 % de nickel . . . . . . | Trempé à l'eau ou recuit à 950° . . . . | ⩾ 75 | ⩾ 45 | 30 | 15 | | 0.55 à 0.65 |
| 36 | Acier nickel-chrome pour engrenages. | Trempé à l'huile à 780° revenu à 250° . . | ⩾ 165 | ⩾ 145 | 4 | 4 | | 0.40 |
| | | | | | | | | **Classe 4. — Aciers** |
| 41 | Acier mangano-siliceux. . . . . . | Trempé à l'huile à 900° revenu à 500° . . . | 130 ± 10 | 90 | 6 | 5 | | 0.45 |
| 42 | Acier à 4 % de Si pour tôles d'induits . . | Recuit . . . . . . . | Cahier des charges spéciales. | | | | | |
| | | | | | | | | **Classe 5. Aciers** |
| 51 | Acier pour roulements . . . . . . | . . . . . . . . . . . . | Cahier des charges spéciales. | | | | | 1 |
| | | | | | | | | **Classe 6. — Aciers spéciaux au** |
| 61 | Acier à 6 % de Tu pour aimants. . . | Recuit. . . . . . . . | Cahier des charges spéciales. | | | | | 0.50 à 0.80 |
| 62 | Acier à 15 % de Tu pour soupapes d'échappement. . . . | Trempé vers 925°, revenu à 550°. . . . | | | | | | |
| | | | | | | | | **Classe 7. — Aciers spéoiaux** |
| 71 | Acier pour soupapes. | Trempé à l'air à 900° | 200 ± 20 | 180 ± 15 | 5 | 4 | | 0.20 à 0.30 |
| 31 bis | Acier nickel chrome de cémentation . . . | Trempé à l'huile à 850° | ⩾ 120 | ⩾ 90 | ⩾ 8 | ⩾ 8 | | ≤ 0.15 |

(1) Les teneurs en chiffres soulignés constituent des conditions de réception; les autres sont données à titre

## BLOOMS ET BILLETTES DESTINÉS A L'AÉRONAUTIQUE

*par des Cahiers des charges spéciales).*

| COMPOSITION MOYENNE (1) | | | | | | | | EXEMPLES | NUMÉROS |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Mn | P minimum | S maximum | Si | Ni | Cr | Va | Tu | d'applications | de catégorie |
| **ordinaires au carbone** | | | | | | | | | |
| < 0.50 | 0.040 | 0.040 | | | | | | Arbres à cames, axes de pistons, poussoirs, bagues de butée, pièces cémentées. Axes de pistons | 10 |
| 0.40 | 0.040 | 0.040 | | | | | | Tôles de cylindre. | 11 |
| 0.30 à 0.50 | 0.040 | 0.040 | | | | | | Tôles de cylindre, ferrures d'avions susceptibles de soudure | 12 |
| 0.30 à 0.50 | 0.040 | 0.040 | | | | | | Boulonnerie, visserie, ergots, chevilles, goupilles, clavettes, ferrures d'avions non susceptibles de soudure | 13 |
| 0.30 à 0.60 | 0.040 | 0.040 | | | | | | Cylindres, plateau d'accouplement de magnéto, bouchons de bougies, rondelles de ressort, carters de rotatif, moyeux d'hélice, boulons, tendeurs et chapes | 14 |
| 0.30 à 0.60 | 0.040 | 0.040 | | | | | | Ressorts, haubans fuselés. | 15 |
| 0.30 à 0.70 | 0.040 | 0.040 | | | | | | Outils divers | 16 |
| **spéciaux au nickel** | | | | | | | | | |
| < 0.50 | 0.040 | 0.040 | | 1.80 à 2.50 | | | | Pièces de cémentation de fatigue moyenne. Axes de pistons | 21 |
| 0.35 | 0.040 | 0.040 | | 4 à 7 | | | | Bielles de rotatif, tubes spéciaux, essieux | 22 |
| | | | | 23 à 25 | | | | Organes spéciaux. | 23 |
| **spéciaux au nickel-chrome** | | | | | | | | | |
| < 0.50 | 0.040 | 0.040 | 0.09 | 2.50 | 0.60 | | | Pièces soumises à de grands efforts et à des chocs, engrenages de démultiplicateur. Axe de pistons, coussinets | 31 |
| 0.40 | 0.040 | 0.040 | 0.20 à 0.30 | 2.50 à 2.80 | 0.70 | | | Pièces de fatigue, vilebrequins, bielles, culbuteurs, soupapes d'admission, coussinets, arbres porte-hélices | 32 |
| 0.25 | 0.040 | 0.040 | 0.30 | 3 à 3.50 | 1 à 1.50 | | | Pièces de fatigue, vilebrequins, bielles. | 33 |
| 0.40 à 0.60 | 0.040 | 0.040 | 0.20 à 0.30 | 3.50 à 5 | 1.20 à 2 | | | Bielles, engrenages, galets, soupapes. | 34 |
| 0.04 | 0.040 | 0.040 | 0.20 à 0.30 | 30 à 33 | 2 à 3 | | | Pièces soumises à des températures élevées, à l'oxydation, soupapes. | 35 |
| 0.40 | 0.040 | 0.040 | | 2.60 | 0.70 | | | Engrenages spéciaux. | 36 |
| **spéciaux au silicium** | | | | | | | | | |
| 0.50 | 0.040 | 0.040 | 1.80 | | | | | Arbres travaillant à la torsion ou flexion, ressorts. | 41 |
| | | | 4 | | | | | Tôles d'induits de magnétos. | 42 |
| **spéciaux au chrome** | | | | | | | | | |
| 0.30 | 0.040 | 0.040 | | | 1.50 | 0.20 à 0.30 | | Anneaux de roulements à billes, galets de culbuteur. | 51 |
| **tungstène et au chrome-tungstène** | | | | | | | | | |
| | | | | | . | | 6 | Aimants. | 61 |
| 0.15 | 0.040 | 0.040 | | | 2.85 | 0.40 | 15 | Conserve la dureté à chaud, soupapes d'échappement pour moteurs poussés. | 62 |
| **au nickel-chrome-tungstène** | | | | | | | | | |
| 0.30 | 0.040 | 0.040 | 0.30 | 4.50 | 0.30 | | 2.40 | Conserve la dureté à chaud, soupapes d'admission et d'échappement. | 71 |
| 0.5 | 0.040 | 0.040 | | | | | | | |

d'indication.

Ex. : Acier 32 = acier 3e classe (nickel-chrome), 2e catégorie (demi-dur).

Les *caractéristiques mécaniques* constituent des conditions de réception.

Les *caractéristiques chimiques* constituent des conditions de réception pour les teneurs en soufre et phosphore des aciers spéciaux y compris des aciers de cémentation au carbone.

Elles constituent de plus des conditions de réception pour les teneurs maxima en carbone et en manganèse des aciers de cémentation.

Les autres caractéristiques chimiques sont données à titre d'indication, de façon à établir la composition moyenne des aciers dans chaque classe et chaque catégorie.

Cette « standardisation » nationale pour l'aéronautique a eu les résultats suivants :

1° Réduction des types d'aciers employés;

2° Suppression dans les marchés des marques multiples qui, en leur qualité de « marques », sont souvent soustraites à toute condition de réception;

3° Éducation des bureaux d'étude et de dessin qui ont pris l'habitude des aciers « standard », des caractéristiques les définissant, des efforts et sollicitations auxquels ils peuvent être soumis. sans compromettre la sécurité;

4° Augmentation et régularisation de la production.

2° NORMES AMÉRICAINES. — Les États-Unis ont établi une feuille de normes ou tableau standard pour automobile et aviation.

A chaque acier correspond un nombre formé de quatre chiffres.

Ce numéro doit donner des indications sur la nature de l'acier.

*Aciers ordinaires au carbone.* — Ces aciers sont numérotés de 1000 à 1100.

Le premier chiffre indique la classe. Carbone ordinaire.

Les deux derniers chiffres représentent la teneur en carbone.

Ex. : Acier 1045 = Acier au carbone ordinaire à 0,45 de carbone.

*Aciers au nickel.* — Ces aciers sont numérotés de 2000 à 3000 exclus.

Le premier chiffre indique la classe « Nickel ».

Le dernier chiffre indique la teneur en nickel.

Les deux derniers chiffres indiquent la teneur en carbone.

Ex. : Acier 2320

| | |
|---|---|
| Teneur en nickel. . . . . . . . . | 3 |
| Teneur en carbone . . . . . . . . | 0,20 |

*Acier au nickel-chrome.* — Ces aciers sont numérotés de 3000 à 4000 exclu.

Le premier chiffre indique la classe nickel-chrome.

Le deuxième chiffre indique la teneur en nickel.

Les deux derniers chiffres indiquent la teneur en carbone.

Rien n'indique la teneur en chrome.

C'est là une insuffisance de la notation.

Ex. : Acier 3315.

| | |
|---|---|
| Teneur en nickel. . . . . . . . . | 3 |
| Teneur en carbone . . . . . . | 0,15 |

La teneur en chrome, qui ne ressort pas de la notation, est comprise entre 0,60 et 0,95.

Nous donnons à titre de renseignement les trois tableaux standards de chacune des classes précitées.

**U. S. STANDARDS.** — **Aciers pour automobiles et aviation**

*Aciers au carbone*

| TYPE | CARBONE | | MANGANÈSE | | PHOSPHORE | SOUFRE | TRAITEMENTS |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | minimum et maximum | Désirée | Minimum et maximum | Désirée | Maximum | Maximum | |
| 1010 | 0,05 — 0,15 | 0,10 | 0,30 — 0,60 | 0,45 | 0,045 | 0,05 | Trempe à 1500° F |
| 1020 | 0,15 — 0,25 | 0,20 | 0,30 — 0,60 | 0,45 | » | » | A ou B |
| 1025 | 0,20 — 0,30 | 0,25 | 0,50 — 0,80 | 0,65 | » | » | H |
| 1035 | 0,30 — 0,40 | 0,35 | 0,50 — 0,80 | 0,65 | » | » | H, D ou E |
| 1045 | 0,40 — 0,50 | 0,45 | 0,50 — 0,80 | 0,65 | » | » | H, D ou E |
| 1095 | 0,90 — 1,05 | 0,90 | 0,25 — 0,50 | 0,35 | 0,040 | » | F |

*Aciers au nickel*

| TYPE | CARBONE | | MANGANÈSE | | PHOSPHORE | SOUFRE | NICKEL | | TRAITEMENTS |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Maximum et minimum | Désirée | Maximum et minimum | Désirée | Maximum | Maximum | Maximum et minimum | Désirée | |
| 2315 | 0,10 — 0.20 | 0,15 | 0,50 — 0,80 | 0,65 | 0,040 | 0,045 | 3,25 — 3,75 | 3,50 | G H ou K |
| 2320 | 0.15 — 0 25 | 0,20 | » | » | » | » | » | » | » |
| 2330 | 0,25 — 0,35 | 0.30 | » | » | » | » | » | » | H ou K |
| 2335 | 0.30 — 0.40 | 0.35 | » | » | » | » | » | » | » |
| 2340 | 0,35 — 0.45 | 0.40 | » | » | » | » | » | » | » |
| 2345 | 0,40 — 0,50 | 0,45 | » | » | » | » | » | » | » |
| 2215 | 0,10 — 0,20 | 0,15 | » | » | » | » | 0,00 — 2,50 | 2,20 | G H ou K |
| 2225 | 0,20 — 0,30 | 0,25 | » | » | » | » | » | » | H ou K |
| 2235 | 0,30 — 0,40 | 0,35 | » | » | » | » | » | » | » |

*Aciers au chrome-nickel*

| TYPE | CARBONE | | MANGANÈSE | | PHOSPHORE | SOUFRE | NICKEL | | CHROME | | TRAITEMENTS |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Maximum et minimum | Désirée | Maximum et minimum | Désirée | Maximum | Maximum | Maximum et minimum | Désirée | Maximum et minimum | Désirée | |
| 3120 | 0,15 — 0,25 | 0,20 | 0,50 — 0,80 | 0,65 | 0,04 | 0,045 | 1,00 — 1,50 | 1,25 | 0,45 — 0 75 | 0,60 | G H ou D |
| 3125 | 0,20 — 0,30 | 0,25 | » | » | » | » | » | » | » | » | H ou D ou C |
| 3130 | 0,25 — 0,35 | 0 30 | » | » | » | » | » | » | » | » | — |
| 3135 | 0,30 — 0.40 | 0,35 | » | » | » | » | » | » | » | » | — |
| 3140 | 0,35 — 0 45 | 0,40 | » | » | » | » | » | » | » | » | — |
| 3220 | 0.15 — 0,25 | 0.20 | 0,30 — 0,60 | 0,45 | 0,04 | 0,04 | 1,50 — 2,00 | 1.75 | 0,90 — 1,25 | 1,10 | G H ou D |
| 3230 | 0,25 — 0.35 | 0.30 | 0,30 — 0,60 | » | » | » | » | » | » | » | H ou D |
| 3240 | 0,35 — 0,45 | 0,40 | » | » | » | » | » | » | » | » | — |
| 3250 | 0,45 — 0,55 | 0,50 | » | » | » | » | » | » | » | » | M ou Q |
| 3315 | 0,10 — 0,20 | 0.15 | 0,45 — 0,75 | 0,60 | 0,04 | 0,04 | 2,75 — 3,25 | 3,00 | 0,60 — 0,95 | 0,80 | G |
| 3335 | 0,30 — 0.30 | 0,35 | » | » | » | » | » | » | » | » | P ou R |
| 3350 | 0,45 — 0,55 | 0,50 | » | » | » | » | » | » | » | » | — |
| 3320 | 0,15 — 0,25 | 0,20 | 0,30 — 0,60 | 0,45 | 0,04 | 0,04 | 3,25 — 3,75 | 3,50 | 1,25 — 1,75 | 1,50 | L |
| 3330 | 0,25 — 0,35 | 0,30 | » | » | » | » | » | » | » | » | P ou R |
| 3340 | 0,35 — 0,45 | 0,40 | » | » | » | » | » | » | » | » | — |

Le tableau standard américain est, comme on le voit, basé principalement sur la composition chimique des aciers.

Les caractéristiques mécaniques, qui sont au premier plan dans le tableau français, passent au second dans le tableau américain.

# ANNEXE

## CAHIER DES CHARGES COMMUNES DES PRODUITS SIDÉRURGIQUES DESTINÉS A L'AÉRONAUTIQUE

# ANNEXE

## CAHIER DES CHARGES COMMUNES PROVISOIRE

### *Relatif à la fourniture des produits sidérurgiques destinés à l'aéronautique.*

ARTICLE 1

La fourniture à l'Aéronautique des aciers ordinaires et des aciers moulés, sous forme de blooms, billettes, barres, reste régie par le cahier des charges communes du 10 septembre 1909, relatif à la fourniture aux divers services du département de la Guerre des aciers ordinaires, des aciers à outils et des aciers moulés, mis à jour le 1er septembre 1915.

Toutefois, ces aciers devront, comme les aciers spéciaux visés à l'article ci-après, être fabriqués ou tout au moins terminés, au creuset, au four électrique, ou au four Martin, à moins qu'il ne soit spécifié autrement dans le cahier des charges spéciales.

Les pièces forgées en acier ordinaire sont soumises aux essais prescrits par le titre III du présent cahier des charges ou les cahiers des charges spéciales relatifs à ces divers produits.

Le présent cahier a pour objet de définir les conditions techniques imposées pour les fournitures des aciers spéciaux à l'aéronautique, c'est-à-dire ceux qui ne sont pas régis par le cahier des charges communes du 10 septembre 1909.

En outre, sont considérés comme aciers spéciaux les aciers au carbone de cémentation.

Il est divisé en trois titres :

Le titre I définit les conditions de fabrication des aciers spéciaux, les procédés et les appareils destinés à en vérifier la stricte observation, ainsi que les mesures à prendre pour effectuer le tarage de ces appareils.

Les titres II et III définissent respectivement les conditions techniques imposées pour la fourniture des aciers spéciaux laminés sous forme de blooms, billettes et barres, d'une part, des aciers spéciaux forgés, d'autre part.

# TITRE I

## CONDITIONS DE FABRICATION
## PROCÉDÉS ET APPAREILS DE MESURE
## TARAGE DES APPAREILS

### Article 2

Les aciers spéciaux destinés à l'Aéronautique sont des aciers fins, fabriqués ou tout au moins terminés au creuset, au four électrique ou au four Martin, à moins qu'il ne soit spécifié autrement dans le cahier des charges spéciales.

Les compositions moyennes seront indiquées par le producteur afin de permettre la vérification de la régularité de la fourniture. Cette composition chimique pourra être vérifiée à n'importe quel stade de la fabrication.

Ces analyses seront faites par l'usine productrice qui en communiquera les résultats au contrôle, ce dernier se réservant le droit de faire exécuter dans les laboratoires officiels toutes les analyses de contrôle utiles.

Ces dernières seront effectuées d'après les méthodes du laboratoire de la S. T. Ae., publiées séparément.

En outre des éléments d'addition Ni, Cr, Tu, destinés à donner aux aciers spéciaux les qualités requises, ces aciers ne doivent pas contenir, sous peine de rebut, une quantité supérieure à 0,040 de soufre et 0,040 de phosphore.

D'autre part, les aciers de cémentation ne doivent pas contenir, sous peine de rebut :

1° Pour les aciers au carbone, plus de 0,15% de carbone et 0,5% de manganèse.

2° Pour les aciers au nickel et au nickel-chrome, plus de 0,12% de carbone et 0,5% de manganèse.

Les cahiers des charges spéciales déterminent les chutes à faire sur les lingots. Ces chutes doivent de toute façon être suffisantes pour faire disparaître les retassures. Avant d'être mis en œuvre les lingots seront burinés pour faire disparaître les criques et les défauts de surface qui pourraient occasionner les amorces de rupture dans les produits laminés ou forgés.

Tous les essais prescrits au présent cahier des charges communes seront faits en principe à l'usine productrice sous la surveillance des agents du contrôle

Après forgeage, estampage ou laminage, les traitements thermiques de régénération, de recuit, de trempe et revenu devront permettre aux pièces d'acquérir les caractéristiques imposées.

## ARTICLE 3

### Instruments de vérification des traitements thermiques.

TEMPÉRATURE

Sur chaque four devra être monté en permanence un indicateur de température quantitatif permettant de donner des indications instantanées. Les appareils devront être régulièrement étalonnés; ils pourront être vérifiés inopinément par le contrôle.

Leurs indications ne devront pas différer de celles de l'étalon de plus de 3% en plus ou en moins.

L'aciérie disposera du nombre suffisant d'instruments de rechange et des bains de vérification nécessaires à leur tarage.

## ARTICLE 4

### Caractéristiques mécaniques des aciers spéciaux.

Les caractéristiques mécaniques des aciers spéciaux qui font l'objet du présent cahier des charges seront déterminées au moyen des quatre modes d'essais suivants :

1° Essais de traction;

2° Essais de fragilité;

3° Essais de dureté;

4° Essais spéciaux (pliage à froid, etc.).

Le service du contrôle pourra employer ces méthodes ou seulement une partie d'entre elles pour la qualification des aciers. Les valeurs et les tolérances relatives à chacune de ces caractéristiques sont indiquées pour chaque nature d'acier spécial dans le tableau ci-annexé et dans les cahiers des charges spéciales.

## ARTICLE 5

### Essai de traction.

a) *Caractéristiques à mesurer.*

Dans ce genre d'essai, on évaluera les caractéristiques suivantes :

La limite d'élasticité;

La charge maxima, dite « de rupture »;

L'allongement centésimal;

La striction;

La limite élastique théorique est définie par la charge unitaire maxima au-dessous de laquelle les allongements sont purement élastiques.

Méthode Standard. — Pratiquement, on admet que la clause fixant pour la limite élastique une valeur de $n$ kilogrammes est remplie si l'éprouvette ayant été soumise à la charge correspondant aux $n$ kilogrammes par millimètre carré pendant 10 secondes, puis déchargée, revient à sa longueur primitive à $\frac{1}{1000}$ près de la longueur entre repères.

La limite élastique figurant dans les cahiers des charges est la limite ainsi définie.

Néanmoins, on pourra avoir recours pour la détermination de la limite élastique à la lecture du diagramme de traction ou à l'observation de la chute de la colonne de mercure de la machine de traction (limite apparente d'élasticité).

Le chiffre ainsi trouvé devra être comparé à celui donné par la méthode standard dans un essai préalable et un terme correctif pourra être établi permettant de passer de l'un à l'autre.

Notamment, en cas de contestation, le chiffre de limite élastique calculé par la méthode standard seul fait foi.

La charge dite conventionnellement « de rupture » sera la charge maximum par millimètre carré supportée avant la rupture par la barrette d'essai. Cette charge maximum sera exprimée en kilos par millimètre carré de la section initiale de l'éprouvette mesurée avant tout essai.

L'allongement centésimal sera mesuré, après rupture de la barrette par rapprochement des fragments de celle-ci, entre deux repères tracés, au moyen de légers coups de pointeau, sur le corps calibré de la barrette. Ces repères seront tracés, avant l'essai, avec un écartement L donné par la formule.

$$L = \sqrt{66{,}67 \times S}$$

dans laquelle S est la section initiale de la barrette d'essai et 66,67 une constante. L et S sont exprimés en millimètres et millimètres carrés.

Cette longueur L de mesure de l'allongement sera portée sur le corps de la barrette d'essai en deux fois, en plaçant chaque fois l'un des deux repères à la naissance de l'un et de l'autre des congés de raccordement de la partie calibrée du corps de l'éprouvette avec les têtes de cette dernière, de façon à croiser les autres repères.

La striction sera évaluée par le rapport :

$$\frac{S - s}{S} \times 100$$

S étant la section initiale de l'éprouvette et $s$ la section de celle-ci au droit de sa cassure.

b) *Barrettes d'essai.*

Les barrettes d'essai dites « normales » prises dans les pièces de forges ébauchées ou terminées seront de trois types choisis de façon à ce qu'on

puisse sûrement prélever ces éprouvettes dans n'importe quelles pièces même de petites dimensions.

Ces barrettes auront une partie cylindrique calibrée avec un écart maximum sur le diamètre de 1/20 mm pour la barrette n° 3 et de 1/10 de mm pour les deux autres types dont il est question ci-après.

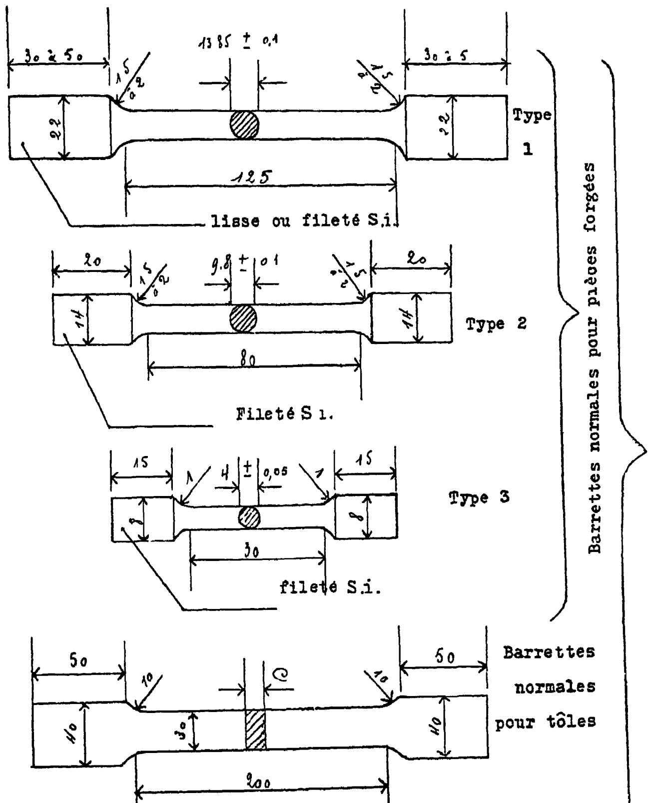



Fig. 121.

La barrette normale type 1 aura un diamètre de 13,8 mm et une longueur de partie calibrée de 125 mm.

Elle sera terminée par deux têtes cylindriques de 22 mm de diamètre, soit lisses, soit filetées au pas S. I. et de 30 à 50 mm de longueur, son corps calibré sera raccordé aux têtes par des congés de 1,5 à 2 mm de rayon.

La barrette normale type 2 aura un corps calibré de 9,8 mm de diamètre et de 80 mm de longueur; elle sera terminée par deux têtes de 14 mm de diamètre et de 20 mm de longueur filetées au pas S I.

Sa partie calibrée sera raccordée aux têtes par des congés de 1,5 à 2 mm de rayon.

La barrette type 3 aura un corps calibré de 4 mm de diamètre et de 30 mm de longueur, elle sera terminée par des têtes de 8 mm de diamètre et de 15 mm de longueur, minimum; filetées au pas S. I., son corps sera raccordé aux têtes par des congés de 1 mm de rayon.

Les barrettes normales prises dans les tôles auront un corps calibré de 30 mm de largeur, elles auront comme épaisseur celle de la tôle. Ce corps calibré aura une longueur de 200 mm. Les têtes auront une largeur de 40 mm et une longueur de 50 mm et seront raccordées au corps au moyen de congés de 10 mm de rayon.

On pourra modifier ces dimensions et prendre des longueurs et largeurs plus faibles, à condition que la longueur du corps soit au moins égale à la longueur de mesure de l'allongement précisée plus haut, augmentée de deux fois la largeur adoptée pour l'éprouvette. En aucun cas l'épaisseur de celle-ci ne pourra être autre que celle de la tôle où elle a été prélevée.

Les allongements des barrettes prises dans les tôles seront mesurés de la même façon que ceux des éprouvettes cylindriques précitées, en répétant au besoin plusieurs fois les longueurs de mesure et en croisant les repères.

### c) *Machines de traction.*

Les machines employées pour les essais de traction seront constituées de telle façon que les efforts qu'elles imposeront aux éprouvettes soient progressifs, sans chocs, que ces efforts soient parfaitement centrés par rapport à l'axe des barrettes, en évitant tous efforts secondaires de flexion ou de torsion par exemple, au moyen d'un dispositif de centrage automatique.

Ces machines seront munies de dispositifs convenables pour qu'on puisse mesurer d'une façon précise et aisée la limite élastique des barrettes d'essais.

La vitesse de l'essai sera convenablement ralentie pour cette mesure. Dès que la limite élastique aura été dépassée, la vitesse d'essai pourra être augmentée mais il sera interdit de la modifier dès que les efforts auront atteint les 8/10$^{e}$ de la charge présumée de rupture des barrettes. La vitesse maximum de traction pendant l'essai sera de 1 cm par minute.

### d) *Tarage des machines de traction.*

Les machines pour essais de traction seront tarées quand le service de contrôle le jugera utile, soit au moyen de poids, eux-mêmes tarés,

que le fournisseur pourra posséder, soit au moyen de dynamomètres étalonnés avec des poids marqués, accompagnés d'une courbe d'étalonnage d'un laboratoire officiel; soit enfin au moyen de barreaux de tarage.

Dans ce dernier procédé, on opérera ainsi qu'il est indiqué dans le cahier des charges communes du 10 septembre 1909, visé plus haut.

On contrôlera les indications de la machine de traction en procédant pour un certain nombre de charges échelonnées entre les limites dans lesquelles la machine est généralement utilisée comme il est indiqué ci-après :

L'usine préparera douze barreaux de traction de même dimension ayant au moins 100 mm entre repères, qui seront prélevés sur un acier aussi homogène que possible.

Ces barreaux seront recuits *simultanément* au rouge cerise. Après ce traitement les agents réceptionnaires répartiront en trois lots égaux les barreaux ainsi préparés.

Les quatre barreaux du dernier lot seront immédiatement cassés sur la machine de traction de l'usine et l'on prendra pour résultat la moyenne des deux charges de rupture intermédiaires accusées par l'appareil de mesure, les quatre valeurs obtenues ayant été au préalable rangées par ordre de grandeur croissante ou décroissante.

L'acier choisi pour le prélèvement des barreaux ne sera considéré comme suffisamment homogène que si les deux charges de rupture extrêmes diffèrent entre elles de moins de 4 % de la valeur maximum obtenue. Si cette condition n'est pas remplie, le tarage sera recommencé avec de nouveaux barreaux d'essai.

L'essai des barreaux devra être exécuté avec la vitesse de traction précisée plus haut.

Un procès-verbal, indiquant les charges de rupture (charge maxima avant rupture) accusées par la machine, sera établi et adressé au Laboratoire de l'Aéronautique en même temps que les barreaux du deuxième lot.

Ce procès-verbal relatera la vitesse de traction employée et fera connaître la loi de variation des efforts en fonction du temps, à partir de la mise en charge de la machine. Il indiquera la limite élastique apparente des éprouvettes, l'allongement total mesuré sur 100 mm et la valeur de la striction.

Les quatre barreaux du deuxième lot seront cassés par les soins du Laboratoire de l'Aéronautique ou en cas de contestation, par le Conservatoire des Arts et Métiers.

Ils devront satisfaire, pour que l'essai soit valable, aux conditions d'homogénéité spécifiées pour les barreaux du premier lot.

Si les résultats obtenus ne sont pas comparables, l'industriel pourra, soit laisser sa machine en l'état, soit procéder à un nouveau réglage.

Dans le premier cas, les résultats fournis par la machine de l'usine, dans tous les essais ultérieurs, seront corrigés de manière à tenir compte des écarts constatés entre cette machine et celle du Laboratoire de l'Aé-

ronautique ou en cas de contestation, celle du Conservatoire des Arts et Métiers.

On pourra se servir à cet effet, *d'une courbe de tarage* que l'on tracera en faisant passer une courbe régulière par les points représentatifs des résultats moyens, comme il a été dit plus haut, pour les diverses charges sur lesquelles aura porté le tarage.

Les points correspondant à chacune de ces charges seront déterminés en prenant pour abscisse les valeurs moyennes obtenues à la machine du laboratoire officiel.

Dans le deuxième cas, les quatre barreaux du troisième lot seront utilisés pour vérifier le nouveau réglage de la machine.

En dehors des tarages dont il est question ci-dessus, les résultats fournis par les machines de traction des usines pourront être vérifiés inopinément par les agents réceptionnaires lorsqu'ils le jugeront utile, au moyen de barreaux de tarage. On emploiera au moins deux barreaux pour chacune de ces vérifications.

On pourra également faire cette vérification au moyen de dynamomètres officiellement étalonnés.

## Article 6

### Essais de fragilité.

a) *Caractéristiques à mesurer.*

Dans ce genre d'essai on déterminera :

La résilience du métal;

La malléabilité de ce métal;

La résilience est le nombre de kilogrammètres rapportés à l'unité de section correspondant à la rupture par choc d'une éprouvette Mes-

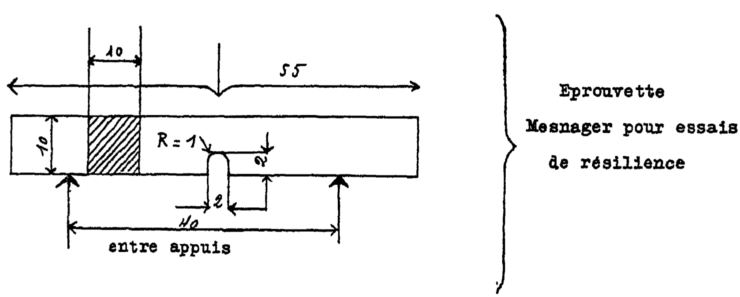



Fig. 122.

nager par le mouton Charpy du modèle utilisé au Conservatoire des Arts et Métiers, type petit modèle.

La malléabilité du métal sera évaluée par l'angle fait par les deux mor-

ceaux rompus de la barrette; elle ne sera déterminée qu'à titre de renseignement.

b) *Éprouvettes d'essais.*

L'éprouvette Mesnager est l'éprouvette classique à 10 mm × 10 mm de section, 55 mm de longueur, 40 mm de distance entre appuis, avec entaille de 2 mm de profondeur avec rayon de fond de 1 mm. L'entaille ne sera pratiquée qu'après traitement thermique complet du barreau.

Les constructeurs utilisant un autre mouton que le mouton Charpy, le tareront par comparaison avec celui des Arts et Métiers.

c) *Machines d'essais de fragilité.*

Les machines employées pour la rupture de ces barrettes devront procéder par choc avec une vitesse d'impact, de 4 m au moins et rompre les barrettes d'un seul coup.

Les lectures doivent pouvoir être faites à 0,2 kilogrammètre près.

Les machines seront vérifiées périodiquement par comparaison avec le mouton Charpy des Arts et Métiers en suivant la méthode ci-après : on prendra deux séries de 4 barreaux entaillés prélevés dans des conditions identiques; 4 barreaux seront essayés chez le constructeur, et 4 au Conservatoire des Arts et Métiers. Les écarts des résultats des deux machines après correction d'après la courbe d'étalonnage ne devront pas différer de plus de 10%.

Le couteau de frappe de l'appareil de choc devra frapper la barrette rigoureusement dans le plan de la section à fond d'entaille, sans possibilité de déviations latérales pendant le choc.

L'essai sera fait à la température ambiante. On indiquera cette température dans le procès-verbal.

La résilience du métal sera obtenue en divisant le travail total de rupture (exprimé en kilogrammètres) de la barrette essayée, par la section exacte de cette barrette mesurée à fond d'entaille, avant tout essai, et exprimée en centimètres carrés.

La mesure de l'angle de rupture de la barrette pour l'évaluation de la malléabilité du métal sera effectuée en raccordant les deux fragments de cette barrette de telle façon que les lèvres de la cassure correspondant au fond de l'entaille, allongée par le choc, se rejoignent sur leurs côtés. L'angle à mesurer sera le supplément de celui formé par les surfaces intérieures des deux morceaux de la barrette rompue.

Cette caractéristique de malléabilité sera mesurée à titre d'indication.

## Article 7

## **Essais de dureté.**

a) *Caractéristiques à mesurer.*

Les essais de dureté ont pour but :

1° De déterminer la dureté propre des pièces métalliques présentées

à la recette en divers points de ces pièces, en vue de vérifier leur homogénéité;

2° De permettre d'évaluer, à titre d'indication, grâce à la connaissance de la dureté et des coefficients de transition, la charge maximum de rupture à la traction du métal des pièces.

b) *Mode opératoire.*

Pour l'évaluation de la dureté du métal, on emploiera la méthode dite « de Brinell ». Pour cela, on imprimera dans le métal des pièces une bille d'acier dur de 10 mm de diamètre avec une charge de 3.000 kg qui sera maintenue 15 secondes.

L'application des pressions jusqu'à cette pression de 3.000 kg sera faite d'une façon progressive et sans chocs ou percussions répétées.

La surface sur laquelle la bille sera appliquée, sera, avant tout essai, soigneusement débarrassée d'oxydes, aspérités ou tous autres défauts, et bien aplanie à la lime douce ou à la meule.

Il restera autour de l'empreinte une largeur de métal égale au moins au diamètre de cette empreinte et, au-dessous de celle-ci, une épaisseur égale au moins au triple de ce diamètre.

Les diamètres de l'empreinte obtenue seront mesurés suivant deux directions perpendiculaires à 1/40 de millimètre près en plus ou en moins. La moyenne de ces deux nombres permettra d'évaluer la surface en millimètres carrés de la calotte sphérique de cette empreinte. En divisant la pression de 3.000 kg précitée par cette surface, on obtiendra le chiffre de dureté du métal.

Connaissant ce chiffre de dureté, on en déduira à titre d'indication la résistance à la traction du métal en multipliant ce chiffre par un coefficient dit « de transition ».

L'homogénéité résultant de la différence maximum entre les diamètres extrêmes de deux empreintes d'une même pièce, sera définie par le cahier des charges spéciales.

c) *Machines de dureté.*

Ces machines comporteront un mécanisme pour la production des efforts et un mécanisme pour la mesure de ces efforts. Le premier procédera par pressions graduelles, la vitesse d'imposition des charges étant d'environ 200 kg par seconde. Le second fera la mesure de ces efforts avec une précision de 1 % près.

Les machines de dureté devront être vérifiées au moyen de poids marqués ou de barreaux d'acier dressés et polis dont la dureté aura été préalablement déterminée au moyen de machines d'essai du Laboratoire de l'Aéronautique militaire ou du Conservatoire des Arts et Métiers.

### ARTICLE 8

## Essais spéciaux.

#### ESSAIS DE PLIAGE A FROID

L'essai de pliage à froid s'applique en principe aux tôles; il sera exécuté à la température ambiante, au moyen d'un dispositif mécanique, sous l'action lente et progressive d'un effort de pression et non de choc.

On emploiera, autant que possible, le mode opératoire suivant, qui exécutera le pliage en deux temps :

1° *Formation du pli.* — La barrette sera placée sur une pièce en forme de V dont les surfaces obliques formeront entre elles un angle de 60° et dont l'ouverture sera d'au moins 125 mm.

On appliquera sur le milieu de l'éprouvette un coin à faces obliques et dont l'arête sera arrondie avec un rayon au moins égal à celui que doit avoir ce pli, une fois l'épreuve terminée.

Ce coin sera descendu jusqu'à ce que la barrette se soit appliquée sur les côtés de l'ouverture de la pièce en V.

2° *Achèvement du pliage.* — Le pliage sera achevé mécaniquement et lentement avec ou sans interposition de cales.

A défaut de ce dispositif, si l'on ne dispose que d'un étau pour faire l'essai, on y fixera la barrette au tiers de sa longueur, on prolongera son extrémité libre par une barre d'acier rigide qui lui sera solidement reliée et on se servira de cette barre comme d'un levier pour plier l'éprouvette à bras et sans à-coups.

La barrette soumise à l'épreuve devra prendre, sans présenter aucune trace de rupture, une courbure permanente telle que l'écartement de ses branches soit celui indiqué individuellement suivant la nature d'acier et l'épaisseur de tôle au cahier des charges spéciales.

### ARTICLE 9

## Préparation des éprouvettes.

*Pour tous les essais précédents.*

Toutes les barrettes, quel qu'en soit le type, seront prélevées dans les pièces, à froid, et au moyen de machines-outils qui n'altèrent pas le métal originel de ces barrettes. Dans le cas où l'on utiliserait le procédé par découpage, poinçonnage, tranchage, cisaillage ou similaire, le cahier des charges spéciales indiquera l'importance des chutes latérales à prévoir.

Les traitements à faire subir aux barreaux d'essai sont indiqués au tableau des aciers ci-joint ou dans les cahiers des charges spéciales.

Le service du Contrôle fera le prélèvement des barrettes suivant les indications des dessins joints aux cahiers des charges spéciales.

Ces barrettes auront, toutes les fois que cela sera possible, des dimensions transversales inférieures de 6 mm à celles des pièces brutes dans lesquelles elles seront prélevées, de façon que le métal qui les a constituées soit débarrassé de la couche superficielle que le chauffage a pu décarburer.

---

## TITRE II

## ACIERS SPÉCIAUX LAMINÉS SOUS FORME DE BLOOMS, BILLETTES OU BARRES

### Article 10

### Élaboration.

Les aciers spéciaux sous forme de blooms, billettes, barres ne peuvent être obtenus qu'en partant de lingots ayant satisfait aux conditions indiquées dans l'article 2 ci-dessus.

### Article 11

### Lotissement.

Les blooms, billettes, barres présentés seront divisés par lots.

Pour les aciers obtenus au four Martin ou au four électrique, le lot sera constitué par les pièces provenant d'une même coulée. Pour les aciers obtenus au creuset, le lot sera constitué par les pièces obtenues dans les mêmes conditions de chargement des creusets sans que le poids du lot puisse excéder 10 tonnes.

Quelle que soit l'origine du métal, chaque bloom, billette ou barre portera le numéro de coulée et une marque spéciale du fournisseur indiquant la nature de l'acier.

Les numéros seront bien apparents et frappés d'une façon indélébile.

Chaque bloom ou billette présenté recevra, de la part du contrôleur, à côté du numéro de coulée et de la marque de l'acier, un poinçon d'identification du lot. Les barres ne recevront seulement que la marque de l'acier et le poinçon d'identification.

## Article 12

### Nature des essais.

Il sera fait une analyse chimique dans tous les cas. Il pourra être fait des essais mécaniques sur les blooms dont les transformations ultérieures ne seront pas effectuées chez le producteur.

Il sera fait des essais mécaniques sur tous les lots de billettes et de barres.

Ces essais seront faits conformément aux prescriptions générales des articles 2 à 9.

## Article 13

### Proportion des essais.

1° Analyses chimiques : 2 par lot.

2° Essais mécaniques : 2 essais de traction et 4 essais de fragilité par lot.

Ces essais seront effectués sur éprouvettes traitées comme il est indiqué au tableau des aciers annexé au présent cahier des charges.

Lorsque les éprouvettes seront essayées trempées, la durée de chauffage pour trempe ou revenu sera de :

10 minutes, si les traitements sont faits dans des bains salins ou métalliques;

20 à 30 minutes, si ces traitements sont faits dans des fours à sole.

Les revenus seront toujours arrêtés par immersion dans l'eau.

## Article 14

### Prélèvement des éprouvettes.

Les éprouvettes seront prélevées en bout sur les pièces désignées par le Contrôle et seront convenablement repérées. Pour les barres de moins de 10 mm d'épaisseur ou de diamètre, les barreaux d'épreuves seront prélevés comme il est dit aux prescriptions générales des articles 2 à 9.

S'il s'agit de pièces dont la section (surface du carré inscrit) est supérieure à 700 mm, et s'il n'est pas fixé de conditions spéciales pour le mode de prélèvement des barreaux de traction, la pièce sera étirée du côté de la chute supérieure du lingot et ramenée à une dimension qui permette de prélever à froid un barreau de 13 mm 8.

## Article 15

### Rebuts et réceptions.

Lorsque l'un des essais du lot ne satisfera pas aux conditions imposées, il sera procédé à deux nouvelles séries complètes d'essais prélevés sur des éprouvettes dans d'autres pièces.

Au cas où ces nouveaux essais seraient mauvais, le lot entier serait rebuté.

De toute façon, les pièces ayant donné de mauvais résultats d'essais seront éliminées.

En cas de rebut, une marque devra être apposée sur la pièce sans porter atteinte à l'utilisation commerciale éventuelle de ladite pièce.

ARTICLE 16

Les tolérances sur les dimensions sont celles indiquées à l'article 12 du cahier des charges communes du 10 septembre 1909.

---

## TITRE III

## PIÈCES FORGÉES EN ACIER

ARTICLE 17

**Élaboration.**

Les pièces seront exécutées avec des aciers répondant aux clauses et conditions fixées à l'article 2 du présent cahier des charges pour les aciers spéciaux et à celles fixées dans le cahier des charges du 10 septembre 1909 visé à l'article 1 pour les pièces en acier ordinaire. Il ne pourra être employé que des procédés de fabrication autorisés le mieux appropriés à l'emploi ultérieur des pièces dans les conditions les plus économiques.

ARTICLE 18

**Lotissement.**

Les pièces de même nature présentées seront divisées en lots. Chaque lot sera constitué par les pièces exécutées avec le métal provenant d'une même coulée.

Chaque pièce, devra, en principe, porter le numéro de la coulée du métal dont elle provient.

ARTICLE 19

**Nature des essais.**

Les essais suivants pourront être effectués :

*a*) Vérification de l'absence de défauts superficiels;

*b*) Essai de dureté;

*c*) Essai de texture;
*d*) Essai de résilience;
*e*) Essai de traction;
*f*) Essais spéciaux.

ARTICLE 20

**Proportion des essais.**

La proportion normale des essais est définie dans le tableau ci-joint (voir p. 285).

ARTICLE 21

**Mode opératoire et prélèvement des éprouvettes.**

a) *Vérification de l'absence de défauts superficiels.*

Après traitement et avant tout essai, les pièces pour lesquelles cet essai est prévu, seront sablées, puis immergées pendant 24 heures dans un bain de pétrole.

Elles seront examinées après séchage, puis 24 heures après.

Les défauts constatés seront sondés au burin jusqu'à disparition de ces défauts.

La pièce sera rebutée dès qu'on se sera rapproché à 1 mm près des cotes définitives.

b) *Essai de dureté.*

Cet essai sera effectué à la bille de Brinell.

Dans tous les cas, les chiffres de dureté extrêmes constatés sur une même pièce doivent différer, au maximum, de 20 unités Brinell

c) *Essai de texture.*

La rupture est faite par choc en un seul coup de mouton.

Pour les pièces destinées à être tournées, une saignée sera faite au tour, concentriquement à l'axe, et laissant subsister la moitié environ de la section primitive. Pour les autres pièces, on fera deux traits de scie parallèles et opposés dans le même plan et laissant subsister environ la moitié de la section primitive de la pièce.

La cassure doit être saine, sans défauts, crasses, soufflures, retassures, oxydation, scories, gouttes froides, etc..., à nervures à grain fin et exempte de cristaux à facettes.

d et e) *Essai de résilience et essai de traction.*

Les éprouvettes pour ces essais seront prélevées soit dans les pièces mêmes, soit dans les surlongueurs spécialement réservées à ces prélèvements et n'ayant subi aucun autre traitement que la pièce elle-même.

Toutefois ces éprouvettes seront prélevées de préférence sur les pièces pour lesquelles l'essai de texture aura donné des résultats douteux.

f) *Essais spéciaux.*

Les prélèvements en vue des essais spéciaux et le mode d'exécution de ces essais seront définis dans chaque cas particulier.

ARTICLE 22

**Interprétation des essais.**

Lorsque les essais auront donné satisfaction, les pièces pourront être utilisées; elles recevront une marque et, dans le cas où cela sera possible, un poinçon d'identification.

Si l'un quelconque de ces essais effectués dans l'ordre prévu à l'article 4 ne donne pas satisfaction et si le cahier des charges particulier n'en stipule pas autrement, une série de contre-essais sera effectuée, dont le pourcentage sera triple de celui fixé pour les essais normaux.

Si tous ces essais sont favorables, les pièces pourront être utilisées et recevront le poinçon d'identification dont il est parlé ci-dessus.

Si l'un seulement de ces contre-essais est défavorable, le lot sera rebuté en principe, toutefois, l'usine productrice pourra procéder à de nouveaux traitements, qui seront suivis d'essais en nombre égal à celui des contre-essais.

Le lot ne sera accepté que si tous les essais sont favorables; dans le cas contraire il sera rebuté.

ARTICLE 23

**Responsabilité du fournisseur.**

Les essais ne seront définitifs que pour les caractéristiques du métal qu'ils ont permis de déterminer. La responsabilité du fournisseur, tant envers le constructeur qu'envers l'État, reste entière pour les vices cachés.

ARTICLE 24

1° Les clauses du présent cahier des charges communes et des cahiers des charges spéciales qui lui sont annexés sont applicables à toutes les fournitures commandées directement par l'État ou à celles faisant l'objet d'une commande directe d'un constructeur à un sous-traitant, lorsque l'État est le destinataire définitif.

2° En dehors de tous les contrôles, l'Inspection technique des produits métallurgiques de l'aviation exercera son action dans les conditions indiquées dans l'instruction du 31 décembre 1917.

3° Les conditions de réception des matériaux entrant dans la construction des avions, approuvées par décisions ministérielles : N° 4202 2/12 du 25 avril 1915; 5075 2/12 du 21 mai 1915; 5795 2/12 du 17 juin 1915 et 2954 2/12 du 21 février 1916 sont abrogées.

1er juillet 1918.

**Cahier des charges communes relatif à la réception des pièces forgées en acier (1).**

*Nombre d'essais de chaque sorte à effectuer sur les pièces présentées à la réception.*

| | DURETÉ | TEXTURE | RESILIENCE | TRACTION | SABLAGE | ESSAIS SPÉCIAUX | OBSERVATIONS |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Culbuteurs, leviers. . . . | 1 p. pièce. | 1 sur 500. | | 1 sur 500 (2) | | | (2) En cas d'insuccès double. |
| Bielles (3). . . . . . . . | 2 p. pièce dont une sur le corps. | | 1 sur 500 sur chute ou dans le corps. | 1 sur 500 dans le corps | 1 p pièce. | | (3) Mêmes résultats que pour les vilebrequins. |
| Vilebrequins. . . . . . . | 3 p. pièce. | 1 p pièce. | 10 sur 100 sur chute en bout du nez (4). | 1 sur 100 sur chute en bout du nez. | 1 p pièce. | Dissection Voir cahier des charges spéciales. | (4) Pour réception définitive essai individuel chez le constructeur avant usinage. |
| Pignons (petits) . . . . . | 1 p pièce. | 1 sur 500. | | | | | |
| Pignons (grands) . . . . | 2 p pièce | 1 sur 50 sur chute d'usinage ou de forage. | | | | | |
| Cylindres . . . . . . . . . | 2 p pièce. | | | | | | |
| Tiges, poussoirs . . . . . | | 1 pour 100. | | 1 sur 500 | | | |
| Carters . . . . . . . . . . | 3 p pièce | | | 1 sur 500. | | | |
| Arbre porte-hélice . . . . | 2 p pièce. | 1 p pièce. | 10 sur 100 sur chute (5) | 1 sur 100 sur chute. | 1 p. pièce. | | (5) Même résultat que pour les vilebrequins |
| Moyeu d'hélices, carters, plateaux, etc. . . . . . | Voir cahier des charges spéciales | | | | | | |
| Clapets et soupapes. . . . | 1 p. pièce. | | | | | Essai de résistance à chaud Voir cahier des charges spéciales. | |
| Cames . . . . . . . . . | | 1 sur 500. | | | | | |
| Galets. . . . . . . . . . | | 1 sur 1.000. | | | | | |
| Porte-embiellage . . . . . | 2 p. pièce. | | 1 sur 500 | | | | |
| Axe de piston. . . . . . | | 1 sur 500 | | | | | |
| Boulonnerie et visserie en acier ordinaire au carbone . . . . . . . . . | Voir cahier des charges spéciales | | | | | | |
| Boulonnerie en acier spécial. . . . . . . . . . | 1 p. pièce. | 1 sur 500 | 1 sur 500. | | | Essai de décollage de la tête 1 sur 500. | |
| Supports, colliers, coussinets. . . . . . . . . . | 1 p pièce | 1 sur 500 | 1 sur 500. | | | | |
| Culot de bougies. . . . . | | 1 sur 1.000 | | | | | |

(1) Les résultats obtenus sont indiqués dans les cahiers des charges spéciales ou annexés aux marchés de fournitures.

# INSTRUCTIONS

*pour l'application du Cahier des charges communes des produits sidérurgiques du 1er juillet 1918, à la réception des pièces de forge, pour lesquelles un cahier spécial n'a pas été notifié.*

---

Les pièces de forge seront, d'après le bon de commande, livrées recuites ou à l'état traité.

*I. — Pièces recuites.* — La nature et le nombre des essais des pièces recuites sont fixés au cahier des charges communes.

Tous les essais, à l'exception de ceux de traction et de résilience, devront donner les résultats prévus au cahier des charges précité.

Les essais de dureté devront révéler l'homogénéité du lot.

Les essais de résilience et de traction seront effectués après traitement : ils devront donner les résultats prévus au cahier des charges communes ou au marché.

*II. — Pièces traitées.* — La nature et le nombre des essais des pièces traitées sont fixés au cahier des charges précité.

Tous les essais, à l'exception de ceux de traction et de résilience, devront donner les résultats prévus au cahier des charges communes.

Les résultats à obtenir dans les essais de résilience et de traction sont en principe ceux indiqués au marché : si aucune condition ne figure au marché, les résultats devront être ceux indiqués au tableau Standard.

# CAHIER DES CHARGES SPÉCIALES PROVISOIRE

## *applicable à la fourniture*

## *des arbres manivelles pour moteurs destinés à l'Aéronautique.*

---

ARTICLE 1

### Conditions générales.

Le présent cahier des charges a pour objet de définir les clauses et conditions spéciales applicables aux arbres manivelles pour moteurs destinés à l'Aéronautique.

Les arbres manivelles bruts de forge devront répondre aux clauses et conditions du cahier des charges communes provisoires relatif à la fourniture des produits sidérurgiques au service de l'Aéronautique et aux clauses et conditions particulières ci-après :

ARTICLE 2

### Forgeage.

L'élaboration de la pièce ne devra comporter aucun découpage à chaud et à froid.

Les torsions, s'il en est, devront être obtenues par forgeage. et les angles de torsion seront réduits à 60° par des opérations de forgeage ou de matriçage appropriées.

Le redressage à froid est rigoureusement interdit. Le redressage devra avoir lieu dans les conditions suivantes : soit à 400°, soit à 100° avec revenu à 400° après redressage.

Les arbres porteront des surlongueurs suivant dessins remis par le S. T. *Aé*.

ARTICLE 3

### Lotissement.

En outre du numéro du lot, chaque arbre manivelle recevra un numéro d'ordre.

## Article 4

### Nature des essais. — Prélèvement des éprouvettes.

Les arbres manivelles seront soumis aux essais prévus dans le cahier des charges communes aux pièces en acier forgé.

Tous les arbres manivelles subiront avant tout autre essai une vérification au sablage dans les conditions prévues au cahier des charges communes.

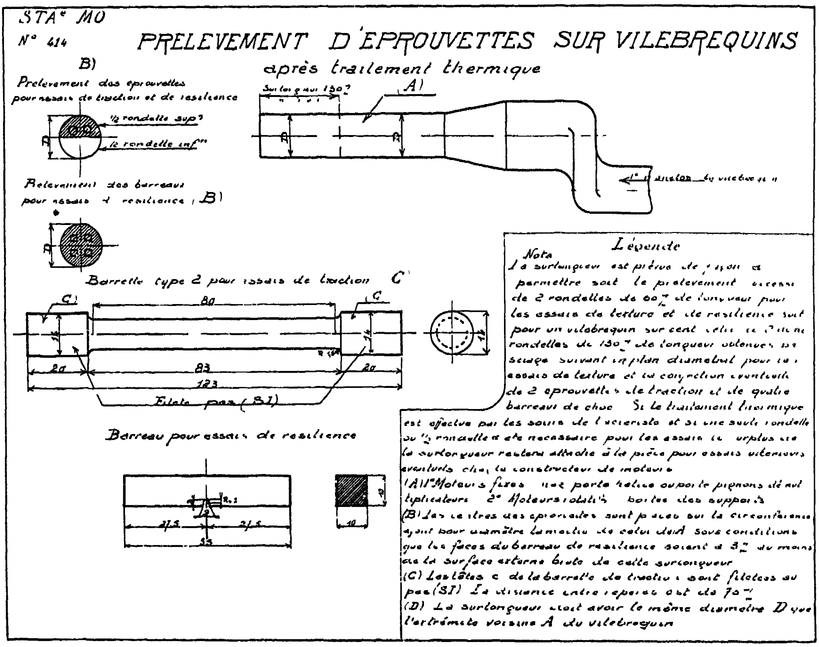



Fig. 123

a) *Essais de dureté.* — Les trois billages seront faits dans les conditions prévues au cahier des charges communes : un à chaque extrémité de l'arbre, un au milieu.

b) *Essai de texture.* — Il sera fait dans les conditions prévues au cahier des charges communes sur une rondelle de 60 mm de longueur prélevée dans la surlongueur.

c) *Essai de résilience.* — L'éprouvette de résilience sera prélevée dans la rondelle détachée pour l'essai de texture. Sa position est indiquée au croquis ci-dessous (fig. 124, n° 1).

d) *Essai de traction.* — L'éprouvette de traction sera prélevée comme il est indiqué au croquis ci-dessous (fig. 124, n° 2).

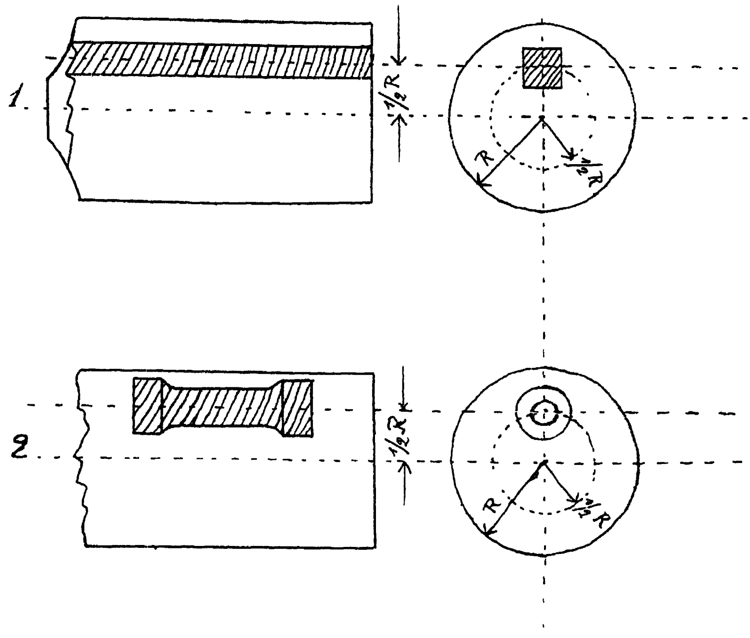



Fig 124.

## Article 5

### Résultats à obtenir.

Les essais devront donner les résultats suivants :

a) L'homogénéité est définie dans le cahier des charges communes, relatif à la réception des pièces forgées en acier (1).

b et c) *Essai de texture et de résilience.* — La résilience minima à obtenir est de 10 dans la surlongueur et de 9 dans le corps, parallèlement à la fibre moyenne.

Les essais de résilience seront faits sur celles des rondelles de texture dont l'aspect semblera indiquer la résilience la plus faible.

---

(1) Différence maxima entre les chiffres de dureté : 20 unités Brinell (pour un même arbre).

d) *Essai de traction.* — Ils devront donner les caractéristiques suivantes :

$$R \geqslant 80 \qquad E \geqslant 70 \text{ kg} \qquad A \geqslant 12\%$$

ARTICLE 6

**Interprétation des essais.**

a) *Essai de dureté.* — Si les résultats obtenus ne répondent pas aux conditions exigées, les arbres manivelles ne seront pas acceptés, mais ils pourront être soumis à un remaniement à la suite duquel ils subiront de nouveau les essais.

b) *Essai de résilience.* — Si tous les essais de résilience ont donné satisfaction, les arbres manivelles du lot pourront être envoyés à l'usinage. En cas d'insuccès, même pour un seul des essais, les arbres manivelles du lot seront essayés individuellement, soit immédiatement, soit après un remaniement.

Les arbres manivelles pour lesquels l'essai individuel aura été satisfaisant seront envoyés à l'usinage. Ceux pour lesquels l'essai individuel ne donnera pas satisfaction pourront être traités une seconde fois et seront de nouveau soumis à la série complète des essais.

Pour hâter la sélection des arbres manivelles, les surlongueurs marquées au numéro de l'arbre manivelle pourront être envoyées chez le constructeur destinataire, qui fera les essais correspondants sous la surveillance du contrôle local afin de permettre l'expédition des arbres manivelles satisfaisants.

Le producteur aura le droit d'assister à ces essais.

ARTICLE 7

**Essais spéciaux de dissection.**

En plus de ces essais, des essais portant sur toute la longueur de l'arbre manivelle, d'après les prélèvements conformes aux dessins du S. T. Aé. seront exécutés par le contrôle local pour s'assurer des caractéristiques du métal.

Le nombre de ces essais n'est pas déterminé *a priori.* Il dépendra de la marche générale de la fabrication et des investigations qui s'imposeront.

Chacun de ces essais entraînant la destruction de l'arbre manivelle, ce dernier, en cas de réussite des essais, sera payé par l'État au producteur. Dans le cas contraire, ce producteur n'aura droit à aucune indemnité.

### Article 8

Il est bien entendu que tous ces essais effectués sur des prélèvements en usine productrice sont indépendants des essais individuels de réception définitive à exécuter chez le constructeur destinataire sous la surveillance du contrôle du Service de fabrication.

# TABLE DES MATIÈRES



## PRODUITS SIDÉRURGIQUES

### TITRE I

### CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES SUR LES TRAITEMENTS DES MINERAIS



### TITRE II

### DÉFINITIONS STANDARDS



### TITRE III

### FONTES



### TITRE IV

### FERS



### TITRE V

### ACIERS

## TITRE VI

### DIAGRAMME D'ÉQUILIBRE



## TITRE VII

### STRUCTURE DES ALLIAGES FER-CARBONE



## TITRE VIII

### TRAITEMENTS THERMIQUES DES ACIERS



## TITRE IX

### TRAITEMENTS CHIMIQUES DES ACIERS



## TITRE X

### CLASSIFICATION ET ÉTUDE DES ACIERS

## TITRE XI

### ÉTUDE D'UN ACIER SPÉCIAL



## TITRE XII

### NORMALISATION



## ANNEXE



IMPRIMERIE BERGER-LEVRAULT, NANCY-PARIS-STRASBOURG — 1930